

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平 11-212044

(43) 公開日 平成11年(1999)8月6日

(51) Int. Cl.⁶

G 0 2 F 1/09

識別記号

5 0 5

F I

G 0 2 F 1/09 5 0 5

審査請求 未請求 請求項の数 3 2

O L

(全 2 3 頁)

(21) 出願番号 特願平10-11795

(22) 出願日 平成10年(1998)1月23日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号

(72) 発明者 寺原 隆文

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 福島 暢洋

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 松本 昂

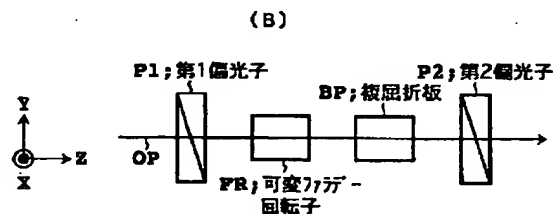
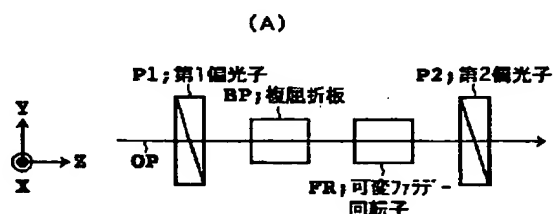
(54) 【発明の名称】 可変光学フィルタ

(57) 【要約】

【課題】 本発明は透過率の波長特性が可変な可変光学フィルタに関し、特性曲線の形状を透過率の軸の方向に変化させることを主な課題としている。

【解決手段】 第1及び第2の偏光子P1、P2と、透過する直交2偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸を有する複屈折素子BPと、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子FRとから構成し、複屈折素子及びファラデー回転子の配列順序並びに光学軸及び各偏光子の透過軸の相対的位置関係を、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するようにして構成する。

可変光学フィルタの
第1及び第2実施形態を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 各々透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸を有する第 1 及び第 2 の偏光子と、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の間に設けられ、透過する直交 2 偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸を有する複屈折素子と、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子とを備え、

上記複屈折素子及び上記ファラデー回転子の配列順序並びに上記光学軸及び上記各透過軸の相対的位置関係は、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が上記ファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される可変光学フィルタ。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

入力光は上記第 1 の偏光子に供給され、

上記入力光は予め定められた帯域を有しており、

該予め定められた帯域は上記特性曲線の周期を与える波長幅の $1/2$ よりも小さい可変光学フィルタ。

【請求項 3】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

入力光は上記第 1 の偏光子に供給され、

上記第 2 の偏光子は部分偏光子からなる可変光学フィルタ。

【請求項 4】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は上記複屈折素子及び上記第 2 の偏光子の間に設けられ、

入力光は上記第 1 の偏光子、上記複屈折素子、上記可変ファラデー回転子及び上記第 2 の偏光子の順に通過し、上記第 1 の偏光子の透過軸と上記複屈折素子の光学軸とがなす角を ϕ とするとき、 $\phi \neq n\pi/2$ (n は整数) を満足する可変光学フィルタ。

【請求項 5】 請求項 4 に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 ϕ は $\pi/4$ に等しい可変光学フィルタ。

【請求項 6】 請求項 5 に記載の可変光学フィルタであって、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の透過軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項 7】 請求項 5 に記載の可変光学フィルタであって、

上記第 2 の偏光子の透過軸は上記複屈折素子の光学軸に平行である可変光学フィルタ。

【請求項 8】 請求項 4 に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 ϕ は $\pi/4$ と異なる可変光学フィルタ。

【請求項 9】 請求項 4 に記載の可変光学フィルタであって、

10

20

30

40

50

上記第 1 の偏光子及び上記複屈折素子の間に設けられる $1/4$ 波長板を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項 10】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は上記第 1 の偏光子及び上記複屈折素子の間に設けられ、

入力光は上記第 1 の偏光子、上記ファラデー回転子、上記複屈折素子及び上記第 2 の偏光子の順に通過し、

上記複屈折素子の光学軸と上記第 2 の偏光子の透過軸とがなす角を θ とするとき、 $\theta \neq n\pi/2$ (n は整数) を満足する可変光学フィルタ。

【請求項 11】 請求項 10 に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 θ は $\pi/4$ に等しい可変光学フィルタ。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の可変光学フィルタであって、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の透過軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項 13】 請求項 11 に記載の可変光学フィルタであって、

上記第 2 の偏光子の透過軸は上記複屈折素子の光学軸に平行である可変光学フィルタ。

【請求項 14】 請求項 10 に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 θ は $\pi/4$ と異なる可変光学フィルタ。

【請求項 15】 請求項 10 に記載の可変光学フィルタであって、

上記複屈折素子及び上記第 2 の偏光子の間に設けられる $1/4$ 波長板を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項 16】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は第 1 及び第 2 のファラデー回転子からなり、

上記複屈折素子は上記第 1 及び第 2 のファラデー回転子の間に設けられ、

入力光は上記第 1 の偏光子、上記第 1 のファラデー回転子、上記複屈折板、上記第 2 のファラデー回転子及び上記第 2 の偏光子の順に通過する可変光学フィルタ。

【請求項 17】 請求項 16 に記載の可変光学フィルタであって、

上記第 1 のファラデー回転子のファラデー回転角と上記第 2 のファラデー回転子のファラデー回転角とが実質的に等しくなるように上記第 1 及び第 2 のファラデー回転子を制御する手段を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項 18】 請求項 1 に記載の可変光学フィルタであって、

上記複屈折素子は第 1 及び第 2 の複屈折素子からなり、上記ファラデー回転子は上記第 1 及び第 2 の複屈折素子の間に設けられ、

記ファラデー回転子、上記第2の複屈折素子及び上記第2の偏光子の順に通過する可変光学フィルタ。

【請求項19】 請求項18に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の複屈折素子の光学軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項20】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる可変移相子を更に備え、

入力光は上記第1の偏光子に供給される可変光学フィルタ。

【請求項21】 請求項20に記載の可変光学フィルタであって、

上記可変移相子は、第1及び第2の $1/4$ 波長板と、該第1及び第2の $1/4$ 波長板の間に設けられるもう1つの可変ファラデー回転子とを備えている可変光学フィルタ。

【請求項22】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は、光路上に配置された磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第1及び第2磁界をこれらの合成磁界の強さが予め定められた値よりも大きくなるように上記磁気光学結晶に対して印加する磁界印加手段と、上記第1及び第2の磁界の強さの少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含む可変光学フィルタ。

【請求項23】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2磁界は上記磁気光学結晶を透過する光の伝搬方向を含む平面内の互いに直交する方向にそれぞれ印加される可変光学フィルタ。

【請求項24】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、

上記磁界印加手段は上記第1及び第2磁界をそれぞれ印加する電磁石及び永久磁石を含み、上記磁界調整手段は上記電磁石の駆動電流を調整する可変光学フィルタ。

【請求項25】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、

上記磁界印加手段は上記第1及び第2磁界をそれぞれ印加する第1及び第2の電磁石を含み、

上記磁界調整手段は上記第1及び第2の電磁石の駆動電流の少なくとも一方を調整する可変光学フィルタ。

【請求項26】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、

上記予め定められた値は上記磁気光学結晶の磁化が飽和するのに必要とされる磁界の強さに相当する値である可変光学フィルタ。

【請求項27】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からな

る第1及び第2のくさび板からなり、

該第1及び第2のくさび板は、該第1のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第2のくさび板の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置され、

第1の光ファイバと、該第1の光ファイバからの光を上記第1のくさび板に供給するための第1のレンズと、上記第2のくさび板からの光を集束させる第2のレンズと、

10 該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項28】 請求項27に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2のくさび板の各々の偏光分離角を θ° 、上記第2の光ファイバのコアの直径を a 、上記第2のレンズの焦点距離を f とするときに、

$$f \sin \theta^\circ < a$$

を満足する可変光学フィルタ。

20 【請求項29】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1の偏光子は複屈折物質からなる第1のくさび板からなり、

上記第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からなる第2及び第3のくさび板からなり、

該第1乃至第3のくさび板は、該第1のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第2のくさび板の底部及び頂部に対向し、該第2のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第3のくさび板の底部及び頂部に対向するように配置され、

30 第1の光ファイバと、
該第1の光ファイバからの光を上記第1のくさび板に供給するための第1のレンズと、

上記第3のくさび板からの光を集束させる第2のレンズと、

該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

40 【請求項30】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からなる第1及び第2の平板からなり、

第1の光ファイバと、

該第1の光ファイバからの光を上記第1の平板に供給するための第1のレンズと、

上記第2の平板からの光を集束させる第2のレンズと、

該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

50 【請求項31】 請求項1に記載の可変光学フィルタで

あって、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる少なくとも1つのフィルタユニットを更に備え、
該少なくとも1つのフィルタユニットの各々は、上記第1の偏光子、上記複屈折素子及び上記ファラデー回転子にそれぞれ相当するエレメントを含む可変光学フィルタ。

【請求項32】 請求項31に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる可変移相子を更に備え、

上記各フィルタユニットは上記可変移相子に相当するエレメントを更に含む可変光学フィルタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般的に光ファイバ通信システム等のシステムに適用可能な可変光学フィルタに関し、特に、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が透過率の軸の方向に変化する可変光学フィルタに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、低損失（例えば0.2 dB/km）な光ファイバの製造技術及び使用技術が確立され、光ファイバを伝送路とする光ファイバ通信システムが実用化されている。また、光ファイバにおける損失を補償して長距離の伝送を可能にするために、信号光を増幅するための光増幅器の使用が提案されあるいは実用化されている。

【0003】従来知られている光増幅器は、増幅されるべき信号光が供給される光増幅媒体と、光増幅媒体が信号光の波長を含む利得帯域を提供するように光増幅媒体をポンピングする手段とを備えている。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）は、光増幅媒体としてのエルビウムドープファイバ（EDF）と、予め定められた波長を有するポンプ光をEDFに供給するためのポンプ光源とを備えている。0.98 μm帯あるいは1.48 μm帯の波長を有するポンプ光を用いることによって、波長1.55 μmを含む利得帯域が得られる。また、半導体チップを光増幅媒体として用いる光増幅器も知られている。この場合、半導体チップに電流を注入することによってポンピングが行われる。

【0004】一方、光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重（WDM）がある。WDMが適用されるシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアが用いられる。各光キャリアを独立に変調することによって得られた複数の光信号が光マルチプレクサにより波長分割多重され、その結果得られたWDM信号光が光ファイバ伝送路へ送出される。受信側では、受けたWDM信号光が光デマルチプレクサによって個々の光信号に分離され、各光信号に基づ

いて伝送データが再生される。従って、WDMを適用することによって当該多重数に応じて一本の光ファイバによる伝送容量を増大させることができる。

【0005】WDMが適用されるシステムに光増幅器を組み入れる場合、しばしば利得傾斜（ゲインチルト）と称される利得特性（利得の波長特性）によって伝送距離が制限される。例えば、EDFAにおいては、波長1.55 μmの近傍で利得偏差が生じる。カスケード接続された複数のEDFAについて利得傾斜が累積すると、利得が小さい帯域に含まれるチャンネルの光SNR（信号対雑音比）が悪くなる。

【0006】光増幅器の利得傾斜に対処するために、利得等化器を用いることができる。利得傾斜の累積によりあるチャンネルの光SNRの劣化が過剰になるよりも前に、適切な位置に設けられた利得等化器によって利得等化が行われる。

【0007】利得等化器として使用可能な光デバイスとして、可変光学フィルタがある。可変光学フィルタにおいては、透過率（又は損失）の波長特性（透過率の波長依存性）が可変である。例えば、光増幅器の利得傾斜を相殺するように可変光学フィルタの波長特性が設定されあるいは制御され、それにより、受信側における光信号のパワーのチャンネル間偏差が小さくなる。

【0008】従来、機械的な可動部分を有する可変光学フィルタが知られている。この種の光学フィルタにおいては、例えば、光学干渉膜や回折格子への光ビームの入射角度が機械的に変化させられ、それにより、透過波長帯域の中心波長あるいは阻止波長帯域の中心波長が変化する。即ち、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が波長の軸の方向に変化する。また、フォトリソグラフィ技術（Photolithography）社から提供されている可変光学フィルタは、スプリットビームフーリエフィルタ（Split-Beam Fourier Filter）を基本原理としており、機械的な手段により、中心波長だけでなく阻止量（透過率）そのものも可変にしている。即ち、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が波長の軸の方向だけでなく透過率の軸の方向にも可変である。

【0009】また、機械的な可動部分がなく電気的手段によって損失の波長特性を変化させることのできる可変光学フィルタとして、導波路型のマッハツェンダ（Mach-Zehnder: MZ）光学フィルタやアコーストオプティックチューナブルフィルタ（Acousto-Optic Tunable Filter: AOTF）等が知られている。

【0010】更に、複屈折フィルタを基本原理とした中心波長可変の光バンドパスフィルタが提案されている（特開平6-130339号）。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】機械的な可動部を有し

ている可変光学フィルタは、高速な動作が困難であり、また信頼性に欠けるという欠点を有している。また、M Z 光学フィルタや AOTF には、現在のところ、(1) 駆動電圧が高い、(2) 消費電力が大きい、(3) 温度安定化装置が必要であり大規模化を避けられない、

(4) 信頼性が得られていない、等の欠点がある。

【0012】このため、(1) 機械的な可動部を有しておらず、従って高い信頼性が得られること、(2) 電気的手段によって制御が可能なこと、(3) 駆動電圧が低く消費電力が小さいこと等の条件を満たす可変光学フィルタが要望されている。

【0013】これらの条件を満たす可変光学フィルタの候補としては、特開平 6-130339 号公報に記載されている可変光学フィルタが挙げられる。この可変光学フィルタは可変なファラデー回転角を与える可変ファラデー回転子を備えており、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って波長の軸の方向に変化するようにされている。しかし、特性曲線の形状は、透過率の軸の方向に変化されることはできない。前述した利得等化器の用途では、例えば阻止波長帯域の損失深さが可変であることが要求されているので、この可変光学フィルタは利得等化器として必ずしも十分な性能を有しているとはいえない。

【0014】よって、本発明の目的は、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が透過率の軸の方向に変化するような可変光学フィルタを提供することにある。本発明の他の目的は以下の説明から明らかになる。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明のある側面によると、第 1 及び第 2 の偏光子と、複屈折素子と、ファラデー回転子とを備えた可変光学フィルタが提供される。第 1 及び第 2 の偏光子の各々は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸を有している。複屈折素子は、第 1 及び第 2 の偏光子の間に設けられ、透過する直交 2 偏光成分間に位相差を与える。位相差は複屈折素子の光学軸によって決定される。ファラデー回転子は、第 1 及び第 2 の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与える。複屈折素子及びファラデー回転子の配列順序と、複屈折素子の光学軸と第 1 及び第 2 の偏光子の各々の透過軸との相対的位置関係とは、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される。

【0016】この構成によると、配列順序及び相対的位置関係が特定の形態に設定されているので、特性曲線の形状が透過率の軸の方向に可変になり、例えば、阻止波長帯域の損失深さを変化させることができるようになり、本発明の目的の 1 つが達成される。

【0017】尚、本願明細書では、「透過率」は電力透過率として定義される。

【0018】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。まず、本発明による可変光学フィルタの構成及び動作を理解する上で有用と思われるので、図 1 を参照して複屈折フィルタについて説明する。複屈折フィルタは、第 1 の偏光子 P 1 と、複屈折板 B P と、第 2 の偏光子 P 2 とを、透過光の光路 O P 上にこの順に配置して構成される。ここでは、光路 O P に平行な Z 軸を有する直交三次元座標系 (X, Y, Z) が採用されている。ここでは、X 軸及び Y 軸は、それぞれ、複屈折板 B P の光学軸 (C 1 軸及び C 2 軸) に平行であり、第 1 偏光子 P 1 の透過軸と Y 軸とがなす角度は 45° であるとする。第 2 の偏光子 P 2 の透過軸と Y 軸とがなす角度は任意である。尚、「偏光子の透過軸」は、透過する直線偏光の振動方向に一致し、より一般的には、その偏光子を透過する偏光の偏光軸を決定する軸として定義される。

【0019】第 1 の偏光子 P 1 を透過した直線偏光が複屈折板 B P に入射すると、この直線偏光は、C 1 軸に平行な偏光面を有する成分と C 2 軸に平行な偏光面を有する成分とに分離されて複屈折板 B P の内部を伝搬する。これらの 2 成分は複屈折板 B P から出力されるときに、波長に従って決定される位相差の下で合成される。複屈折板 B P の厚みが入射光の波長に比べて十分大きい場合、複屈折板 B P の出力において合成される光の偏光状態は波長に応じて異なる。即ち、合成された光は、波長によって、直線偏光であるかも知れないし、円偏光又は楕円偏光であるかも知れない。第 2 の偏光子 P 2 の透過率は、第 2 の偏光子 P 2 に入射する光の偏光状態に依存するため、波長によって異なる。例えば、第 2 の偏光子 P 2 の透過軸がある波長の直線偏光に平行になるように固定されているとすると、その波長の光に対する第 2 の偏光子 P 2 の透過率は原理的に 100% となる。これとは異なる波長においては、第 2 の偏光子 P 2 の透過軸と直交する直線偏光に対しては、第 2 の偏光子 P 2 の透過率は原理的には 0% となる。更に、他の波長の円偏光に対する第 2 の偏光子 P 2 の透過率は原理的には 50% であり、別の波長の楕円偏光に対する第 2 の偏光子 P 2 の透過率は楕円偏光の楕円率に応じたものとなる。このようにして、この複屈折フィルタの透過率は光の波長に依存して変化することになる。

【0020】図 2 の (A) 及び (B) は従来の可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。例えば、特開平 6-130339 号公報に記載されている可変光学フィルタでは、図 1 の複屈折フィルタの複屈折板 B P に代えて、ファラデー回転子及び 2 つの $1/4$ 波長板を含む移相子を設け、これにより透過率が波長に対して周期的に変化するような波長特性が得られている。この波長特性を与える特性曲線の形状は、図 2 の (A) に実線及び破線で示されるように波長の軸の方向に可変で

ある。

【0021】従って、この可変光学フィルタを用いることにより、図2の(B)に示されるように、特性曲線の形状が波長の軸の方向に可変である光バンドパスフィルタを提供することができる。

【0022】図3の(A)及び(B)は、本発明に要求されている可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。図2の(A)では特性曲線の形状が波長の軸の方向に可変であるのに対して、図3の(A)に示されるように、特性曲線の形状が透過率の軸の方向に可変である可変光学フィルタが要求されているものである。具体的には、利得等化器としての使用を考慮して、例えば図3の(B)に示されるように、阻止波長帯域における損失深さが可変であるノッチフィルタの実現が要求されているのである。

【0023】次に、図1の複屈折フィルタについての定量的な解析を行った上でこれを発展させて、図3の

$$\begin{aligned} E \sin \theta + E 2 \cos \theta &= \sin \phi \sin \phi \sin (\omega t + \epsilon 1) + \cos \phi \cos \theta \sin (\omega t + \epsilon 2) \\ &= (\sin \phi \sin \theta \cos \epsilon 1 + \cos \phi \cos \theta \cos \epsilon 2) \sin \omega t + \\ &\quad (\sin \phi \sin \theta \sin \epsilon 1 + \cos \phi \cos \theta \sin \epsilon 2) \cos \epsilon t \end{aligned}$$

となる。従って、透過光の強度Iは、 $I = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2((\epsilon 1 - \epsilon 2)/2)$ となる。複屈折板BPの厚みをd、複屈折板BPにおける常光線および異常光線の屈折率差を μ 、波長を λ とする ※

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \mu d / \lambda) \dots\dots\dots(1)$$

と表すことができる。(1)式により、透過光強度は、波長依存性を持ち、波長に対して周期的に変化することが分かる。ここで、実際に使用する波長帯域に比べて、波長の値が大きいと、 $1/\lambda$ は、次のように一次関数で近似することができる。

$$1/\lambda = a\lambda + b$$

が得られる。ここで、FSR (Free Spectral Range) は、透過率の波長特性における波長周期を表し、次式で与えられる。

$$FSR = 1/a\mu d \dots\dots\dots(2)$$

従って、所要のFSRを得るためには、複屈折板BPの材料によって決定される屈折率差 μ が一定であるとする、複屈折板BPの厚みdを調整すればよいことがわかる。

【0028】さて、(1)式により、角 ϕ 及び/又は角 θ を変化させると、透過光強度も変化することがわかる。図6を参照すると、例えば、角 ϕ を $\pi/4$ (45°)とし、角 θ の値を変化させたときの透過率の波長特性の変化の様子が示されている。縦軸は透過率(真値)であり、横軸はFSRで規格化された相対波長である。また、角 θ の値として正の値と負の値があるのは、C2軸と透過軸P2Aとの間の相対的な回転方向を示すためであり、これについては後で詳しく説明する。

【0029】角 θ を変化させる直接的な方法は、第2の

* (A) 及び (B) に示されるような特性を有する可変光学フィルタを提供するための方法を示す。今、図1の複屈折フィルタにおいて、第1の偏光子P1の透過軸P1Aと、複屈折板BPの光学軸(C1軸及びC2軸)と、第2の偏光子P2の透過軸P2Aとが、図4に示されるような位置関係にあると仮定する。即ち、透過軸P1AとC2軸とがなす角を ϕ とし、透過軸P2AとC2軸とがなす角を θ とする。

【0024】透過軸P1Aに平行に、直線偏光 $\sin(\omega t)$ が入射した時、複屈折板BPを通過した光のC1軸に平行な成分E1とC2軸に平行な成分E2は、両成分の位相遅れをそれぞれ $\epsilon 1$ 及び $\epsilon 2$ とすると、それぞれ、

$$E1 = \sin \phi \sin (\omega t + \epsilon 1)$$

$$E2 = \cos \phi \sin (\omega t + \epsilon 2)$$

と書ける。第2の偏光子P2を出た光の振幅は、

※と、

$$(\epsilon 1 - \epsilon 2) / 2 = \pi \mu d / \lambda$$

となる。従って、透過光の強度Iは波長 λ の関数I(λ)となり、

☆例えば、図5に示される様に、波長帯域を1500nm ~ 1600nmとすると、 $a = 4.165 \times 10^{-7}$ (1/nm²)、 $b = 1.291 \times 10^{-3}$ (1/nm)となる。

【0026】従って、bを無視して相対波長のみを考えると、

30

☆

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \lambda / FSR) \dots\dots\dots(1)'$$

偏光子P2の透過軸P2Aを回転することである。現状の技術では、機械的手段を用いずに透過軸が回転することができる偏光子はない。また、機械的な手段を用いれば透過軸を回転する偏光子を提供することができるが、機械的可動部を有している可変光学フィルタは、高速動作が困難であり又信頼性に欠ける等の問題を有している。そこで、本発明では、以下に詳しく説明するように、可変ファラデー回転子を用いる方法が提案される。

40

【0030】角 θ は、第2の偏光子P2の透過軸P2AがC2軸となす角度であり、第2の偏光子P2へ入射される光の偏光軸と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角度であるということもできる。即ち、「第2の偏光子P2の透過軸P2Aを回転すること」は、「第2の偏光子P2へ入射される光の偏光軸を回転すること」と実質的に同じである。従って、可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子を例えば複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に配置し、第2の偏光子P2に入射される偏光の方位角を回転すれば、角 θ が変化したのと

50

同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることが可能である。

【0031】また、同じように、可変ファラデー回転子を第1の偏光子P1と複屈折板BPの間に配置し、複屈折板BPに入射される偏光の方位角を回転すれば、角 ϕ が変化したのと同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることが可能である。

【0032】図7の(A)及び(B)を参照すると、それぞれ本発明による可変光学フィルタの第1及び第2実施形態が示されている。図7の(A)に示される第1実施形態では、可変ファラデー回転子FRは複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に設けられており、図7の(B)に示される第2実施形態では、可変ファラデー回転子FRは第1の偏光子P1と複屈折板BPとの間に設けられている。

【0033】ここで、第1及び第2実施形態の各々において、本発明による可変光学フィルタを実施するための最も単純で且つ明確な要件を再確認しておく。各実施形態では、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRは、第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に設けられる。第1の偏光子P1は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸P1Aを有しており、第2の偏光子P2は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸P2Aを有している。複屈折板BPは、透過する直交2偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸(C1軸及びC2軸あるいはそのいずれか一方)を有している。可変ファラデー回転子FRは、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与える。そして、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRの配列順序と光学軸(例えばC1軸)並びに透過軸P1A及びP2Aの相対的位置関係とは、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される。

【0034】また、複屈折板BPの厚みは、所要のFSRが得られるように設計される。透過率の波長依存性を実現するために、複屈折板BPとしては、 $1/4$ 波長板や $1/2$ 波長板と呼ばれる複屈折板に比べて厚く、具体的には使用される波長よりも十分大きい厚みを有する複屈折板が用いられる。更に具体的には、 20 波長乃至 100 波長に相当する位相差を与えることができる複屈折板が採用される。

【0035】図7の(A)に示される第1実施形態では、入力光は、光路OPに沿って第1の偏光子P1、複屈折板BP、可変ファラデー回転子FR及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0036】図7の(B)に示される第2実施形態では、入力光は、光路OPに沿って第1の偏光子P1、可変ファラデー回転子FR、複屈折板BP及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0037】図8は本発明による可変光学フィルタの各

実施形態における部材間の位置関係を示す図である。ここでは、直交三次元座標系(X, Y, Z)において、Z軸は光路OPに平行であるとし、Y軸は第1の偏光子P1の透過軸P1Aに平行であるとする。また、 ϕ 、 θ 及び δ を新たにあるいは更に明確に次のように定義する。

【0038】 ϕ : 複屈折板BPのC1軸と第1の偏光子P1の透過軸P1A(Y軸)とがなす角。符号は、Y軸からC1軸に向かって回転するとき右回りとなる角を正とする。

10 【0039】 θ : 複屈折板BPのC1軸と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角。符号は、透過軸P2AからC1軸に向かって回転するとき右回りとなる角を正とする。

【0040】 δ : 第1の偏光子P1の透過軸P1A(Y軸)と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角。符号は、Y軸から透過軸P2Aに向かって回転するとき右回りとなる角を正とする。

20 【0041】従って、 $\phi = \theta + \delta$ となる。また、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角 α の符号は、X軸からY軸に向かって回転するとき左回りとなる角を正とする。

【0042】尚、図8において、符号PSで表される楕円(円を含む)及び直線の群は、 $\alpha = 0$ であるとしたときにおける複屈折板BPの出力における偏光状態の波長依存性を表している。

30 【0043】可変光学フィルタの透過光強度に波長依存性を持たせるためには、(1)式から明らかなように、「 $\sin(2\phi) \sin(2\theta)$ が常に0である」という条件を避ける必要がある。このため、図7の(A)に示される第1実施形態のようにファラデー回転子FRを用いて角 θ を実質的に変化させたのと同じ状態を提供する場合には、 $\phi \neq n\pi/2$ (n は整数)とする。また、図7の(B)に示される第2実施形態のように、ファラデー回転子FRを用いて角 ϕ を実質的に変化させたのと同じ状態を提供する場合には、 $\theta \neq n\pi/2$ (n は整数)とする。

40 【0044】光学理論によれば、光の偏光状態及び光素子とその通過光に及ぼす作用は、 1×2 行列で表されるジョーンズベクトル(Jones Vector)及び 2×2 行列で表されるジョーンズマトリックス(Jones Matrix)により表現される。また、各通過点における光電力は、ジョーンズベクトルの2成分の二乗和で表される。ジョーンズベクトル及びジョーンズマトリックスを用いた行列計算により、本発明による可変光学フィルタの透過率(電力透過率)を計算可能である。

50 【0045】図9は、図7の(A)に示される第1実施形態における透過率の波長特性を計算した結果を表している。ここでは、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α を変化させている。縦軸は透過率(dB)、横

軸はFSRで規格化された相対波長を表している。ここでは、波長特性を与える特性曲線の形状が、相対波長が0.25及び-0.25である点を不動点として、ファラデー回転角 α に従って透過率の軸(縦軸)の方向に変化していることが明らかである。

【0046】 $\phi = \pi/4$ とした場合には、 $-\delta < \alpha < \pi/2 - \delta$ の範囲($\pi/2$ の範囲)で、又は、 $\phi = -\pi/4$ とした場合には、 $-\delta > \alpha > -\pi/2 - \delta$ の範囲($\pi/2$ の範囲)でファラデー回転角 α を変化させれば、透過率の波長特性がとり得る全ての状態を実現することができる。

【0047】また、この関係により、 $\delta = 0$ 、即ち透過軸P1A及びP2Aを互いに平行にすると、変化させるファラデー回転角 α の符号は正負どちらか一方だけを選べばよいことがわかる。従って、 $\delta = 0$ とすることにより、 $0 < \alpha < \pi/2$ 又は $0 > \alpha > -\pi/2$ となり、ファラデー回転角 α を一方向だけに与える可変ファラデー回転子FRの構成を簡単にすることができる。このことは、図7の(B)に示される実施形態においても同様である。

【0048】これとは逆に、ファラデー回転角 α を両方向に与えることができる可変ファラデー回転子を用いれば、 $\delta = \phi$ と設定することにより、 $\alpha = 0$ のときに透過率が波長によらず一定になる。例えば、本発明による可変光学フィルタをシステムに組み込んだ場合において、制御オフとなり $\alpha = 0$ となったときに、透過率が波長によらず一定となっていることが望ましい場合がある。また、このときには $-\pi/4 < \alpha < \pi/4$ となるため、ファラデー回転角 α の絶対値は $\pi/4$ より小さくなり、磁気光学効果を応用した可変ファラデー回転子等が用いられている場合に、ファラデー回転角 α を最大値に設定しているときの消費電力を低減することが可能になる。図7の(B)に示される第2実施形態においても同様の議論が成り立ち、その場合には、 $\delta = \theta$ とすればよい。

【0049】図9のような特性を有する可変光学フィルタは、例えば、損失傾斜が可変であるパワー等化器としての応用が考えられる。ここで、「損失傾斜」は、図10に示されるように、透過率を対数表示で表したときの透過率の波長特性を与える特性曲線が直線的であるときに、その傾きを指す。損失傾斜が可変であるパワー等化器は、例えば、光ファイバ通信システムにおいて、光増幅器の利得傾斜を等化する場合や、光ファイバの損失傾斜を補償する場合等に有効である。

【0050】図9に示される特性を有する可変光学フィルタを損失傾斜が可変である等化器として用いる場合には、例えば、次のように使用波長帯域を選ぶことによって、波長帯域内の損失の平均値(以下、「平均損失」と称する。)を一定に保つことが可能になる。即ち、最大損失又は最小損失が得られる幾つかの波長のうち、隣り

合う2つの波長の中心値を使用波長帯域の中心波長に選び、且つ、使用波長帯域の帯域幅をFSRの1/2よりも小さく設定する。

【0051】図11は、図9に示されるグラフにおいて各々最大損失又は最小損失が得られるA点及びB点の中心値を与えるC点を使用波長帯域の中心波長とし、FSRの1/5を使用波長帯域として選んだ例である。損失傾斜が可変である特性が得られていることがわかる。また、この例では、ファラデー回転角 α を変化させても平均損失は変化しないことがわかる。尚、図11のグラフにおいては、各特性曲線が直線的であることを明らかにするために、完全な直線が破線で示されている(図13及び16においても同様)。

【0052】しかしながら、図11の特性を有する可変光学フィルタでは、平均損失が3dBという大きな値となることが欠点である。この問題を解決するためには、以下の2つの方法が考えられる。

【0053】まず、第1の方法は、透過軸P1A及びP2Aのいずれか一方と複屈折板BPのC1軸とがなす角(ϕ 又は θ)を $\pm\pi/4$ と異ならせる方法である。例えば、図7の(A)に示される第1実施形態においては、 $0 < \phi < \pi/4$ が満たされるように角 ϕ を設定し、且つ、 $-\delta < \alpha < 2\phi - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させるか、あるいは、 $-\pi/4 < \phi < 0$ が満たされるように角 ϕ を設定し、且つ、 $-\delta > \alpha > 2\phi - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させる。

【0054】図12の(A)及び(B)の各々は、 $\phi = \pi/6$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α を変化させながら透過率の波長特性を計算した結果である。また、図13は図11における相対波長の範囲に準じて図12の(A)及び(B)の各々に示される波長特性を拡大して得られた波長特性を示している。

【0055】図13から明らかなように、図11に示される波長特性と比較して平均損失が小さくなっていることがわかる。但し、図13の例では、ファラデー回転角 α の変化に応じて平均損失が変化することになる。

【0056】図7の(B)に示される第2実施形態においては、 $0 < \theta < \pi/4$ が満たされるように θ を設定し、且つ、 $-\delta > \alpha > -2\theta - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させるか、あるいは、 $-\pi/4 < \theta < 0$ が満たされるように θ を設定し、且つ、 $-\delta < \alpha < -2\theta - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させることによって、図7の(A)の第1実施形態におけるのと同様の効果が得られる。

【0057】尚、第1の方法により角 ϕ 又は角 θ を $\pm\pi/4$ と異なるように設定した場合にも、角 $\delta = 0$ とすることにより、ファラデー回転角 α を一方向だけに与える可変ファラデー回転子を用いることができるようになる。また、図7の(A)に示される第1実施形態においては $\delta = \phi$ とすることにより、また、図7の(B)に示

される第2実施形態においては $\delta = \theta$ とすることにより、制御オフとして $\alpha = 0$ となったときに透過率が波長によらず一定となる効果が得られる。

【0058】角 ϕ 又は角 θ を $\pm\pi/4$ と異ならせることにより得られる効果は、図14の(A)及び(B)の各々に示されるように、 $1/4$ 波長板を適切な位置に適切な角度で挿入し、偏光方位をずらすことによっても実現できることは明らかである。

【0059】図14の(A)に示される本発明による可変光学フィルタの第3実施形態は、図7の(A)に示される第1実施形態と対比して、第1の偏光子P1と複屈折板BPとの間に $1/4$ 波長板2が付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0060】図14の(B)に示される本発明による可変光学フィルタの第4実施形態は、図7の(B)に示される第2実施形態と対比して、複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に $1/4$ 波長板2'が付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0061】第2の方法は、第2の偏光子P2として部分偏光子を用いる方法である。ここで、「部分偏光子」は、透過軸と直交する偏光面を有する直線偏光の入射に対して、透過率が0（真数）ではないある値を示す偏光子を指す。部分偏光子において、透過軸と直交する偏光面を有する直線偏光の透過率を t と定義する。

【0062】図15は、第2の偏光子P2として $t = 0.25$ （ -6 dB）の部分偏光子を用い、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ として、ファラデー回転角 α を変化させながら透過率の波長特性を計算した結果を示している。また、図16は図15に示される波長特性の一部を拡大して得られた波長特性を示している。図16に示される特性を図11に示される特性と比較すると、平均損失が小さくなっており、しかも、ファラデー回転角 α の変化に対して平均損失が変化していないことが明らかである。

【0063】図7の(A)に示される第1実施形態において第2の方法を実施する場合には、 $\phi = \pm\pi/4$ に設定することにより、可変量（ある波長における透過率の可変範囲）を最大にすることができる。前述したように、透過率の波長特性がとり得る全ての状態を実現することができるからである。また、図7の(B)に示される第2実施形態において第2の方法を実施する場合に、 $\theta = \pm\pi/4$ に設定することにより、同じく可変量を最大にすることができる。第2の方法を実施する場合にも、 $\delta = 0$ とすることにより、一方向にファラデー回転角 α を与える可変ファラデー回転子を用いることができるようになる。また、図7の(A)に示される第1実施形態においては $\delta = \phi$ とすることにより、また、図7の(B)に示される第2実施形態においては $\delta = \theta$ とすることにより、制御オフとして $\alpha = 0$ となったときに透過率が波長によらず一定となる効果が得られる。

【0064】第1及び第2の方法は、最大損失に有限の

値を与えるためにも有効である。例えば、図7の(A)に示される第1実施形態において $\phi = \pi/4$ とした場合、原理的には電力透過率が0（真数）の値をとり得るため、図9から明らかなように、最大損失（dB）は無限大になる。このような特性はシステム運用上好ましくない場合がある。そこで、第1又は第2の方法を用いることにより、最大損失（dB）を有限の値に抑えることが可能となる。このことは、図12の(A)及び(B)並びに図15から明らかである。

10 【0065】図17は本発明による可変光学フィルタの第5実施形態を示す図である。この実施形態は、これまでに説明した実施形態において1つの可変ファラデー回転子FRが用いられているの対比して、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2の間に2つの可変ファラデー回転子FR1及びFR2が設けられている点で特徴付けられる。複屈折板BPはファラデー回転子FR1及びFR2の間に設けられる。

【0066】この構成によると、これまでに説明した波長特性と異なる波長特性を得ることができる。例えば、 $\phi = \pm\pi/4$ 、 $\delta = n\pi/2$ （ n は整数）とし、ファラデー回転子FR1によって与えられるファラデー回転角 α_1 とファラデー回転子FR2によって与えられるファラデー回転角 α_2 を、 $\alpha_1 = \alpha_2$ を保ちながら回転させる場合を考える。

【0067】入力光は、光路OPに沿って、第1の偏光子P1、ファラデー回転子FR1、複屈折板BP、ファラデー回転子FR2及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0068】図18は、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α （ α_1 及び α_2 ）を、 $0 < \alpha < \pi/4$ の範囲で回転させた場合の透過率の波長特性を示している。ここでは、第2の偏光子P2としては部分偏光子が用いられている。

【0069】図18から明らかなように、透過率の波長特性における最小損失が、ファラデー回転角 α によらず常に0となる特性が得られている。このように $\alpha_1 = \alpha_2$ を保ちながら各ファラデー回転角を変化させるために、図17の第5実施形態では、制御ユニット4がファラデー回転子FR1及びFR2に接続されている。制御ユニット4は、ファラデー回転子FR1によって与えられるファラデー回転角 α_1 とファラデー回転子FR2によって与えられるファラデー回転角 α_2 とが実質的に等しくなるようにファラデー回転子FR1及びFR2を制御する。

【0070】図19は本発明による可変光学フィルタの第6実施形態を示す図である。この実施形態は、これまでの実施形態では1つの複屈折板BPが用いられているの対比して、2つの複屈折板BP1及びBP2が第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に設けられている点で特徴付けられる。

【0071】可変ファラデー回転子FRは複屈折板BP 1及びBP 2の間に設けられている。入力光は、光路OPに沿って、第1の偏光子P 1、複屈折板BP 1、ファラデー回転子FR、複屈折板BP 2及び第2の偏光子P 2をこの順に通過する。

【0072】このように2つの複屈折板BP 1及びBP 2を用いることにより、図18に示される波長特性に似た波長特性を得ることができる。例えば、複屈折板BP 1及びBP 2の光学軸について前述の角 ϕ と同様にそれぞれ定義される角 ϕ_1 及び角 ϕ_2 を等しくし($\phi_1 = \phi_2$)、また、 $\phi_1 = \pm \pi/4$ 、 $\phi_2 = \pm \pi/4$ 、 $\delta = n\pi/2$ (n は整数)とする。

【0073】図20は、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転子FRの回転角 α を $0 < \alpha < \pi/2$ の範囲で回転させた場合における透過率の波長特性を示している。ここでは、第2の偏光子P 2として部分偏光子を用いている。

【0074】図20から明らかなように、透過率の波長特性における最小損失がファラデー回転角 α によらず常に0となる波長特性が得られている。また、図19の第6実施形態においても、 $\delta = 0$ とすることにより、一方向に可変のファラデー回転角 α を与えるファラデー回転子を用いることができるようになる。

【0075】図21は本発明による可変光学フィルタの第7実施形態を示す図である。この実施形態は、第1の偏光子P 1と第2の偏光子P 2との間に設けられる可変移相子6を付加的に備えていることで特徴付けられる。可変移相子6は、その光学軸に平行な偏光成分とそれに直交する偏光成分との間に位相差(リタデーション)を与え、その位相差は可変移相子6に供給される制御信号により可変である。

【0076】第1の偏光子P 1、複屈折板BP、可変ファラデー回転子FR及び第2の偏光子P 2は図7の(A)に示される第1実施形態に準じて配置されており、ここでは、可変移相子6は第1の偏光子P 1と複屈折板BPとの間に設けられている。

【0077】図21の実施形態によると、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が可変ファラデー回転子FRにより与えられるファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するだけでなく、特性曲線の形状は、可変移相子6によって与えられる位相差の変化に従って、波長の軸の方向にも変化するようになる。従って、図3の(A)及び(B)により説明した可変光学フィルタの特性だけでなく、図2の(A)及び(B)により説明した可変光学フィルタの特性も得られることとなる。

【0078】特性曲線の形状を最も有効に波長の軸の方向に変化させるためには、可変移相子6の光学軸と複屈折板BPの光学軸とのなす角度が $n\pi/2$ (n は整数)となっていることが望ましい。

【0079】可変移相子6としては、例えばLiNbO₃等の電気光学効果を応用したものを採用することができる。しかしながら、電気光学効果を応用した可変位相子は、一般に、高い駆動電圧を必要とする。

【0080】図22は本発明による可変光学フィルタの第8実施形態を示す図である。この実施形態では、特定構成の可変移相子6を採用し、可変移相子6の駆動電圧の低減を図っている。

【0081】可変移相子6は、2枚の1/4波長板10及び12と、1/4波長板10及び12間に設けられるもう1つの可変ファラデー回転子8とを備えている。1/4波長板10の光学軸と1/4波長板12の光学軸とのなす角は $\pi/2$ に設定されている。

【0082】1/4波長板10及び12の各々の光学軸と複屈折板BPの光学軸とのなす角を $n\pi/2$ (n は整数)に設定することによって、この可変光学フィルタの透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が可変ファラデー回転子8によって与えられるファラデー回転角の変化に従って波長の軸の方向に変化するようになる。

【0083】尚、ファラデー回転子8によって与えられるファラデー回転角が β である場合、可変移相子6によって直交2偏光成分間に与えられる位相差は 2β になる。この原理は、特開平6-130339号公報の開示内容及び周知技術により自明であるので、その説明を省略する。

【0084】図23は本発明による可変光学フィルタの第9実施形態を示す図である。この実施形態は、図22の第8実施形態と対比して、第1の偏光子P 1と第2の偏光子P 2との間に少なくとも1つのフィルタユニットが付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0085】ここでは、N (N は1より大きい整数) 台のフィルタユニット14 (#1, ..., #N) が設けられている。 i (i は $1 \leq i \leq N$ を満たす整数) 番目のフィルタユニット14 (# i) は、それぞれ第1の偏光子P 1、可変移相子6、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRに対応する偏光子P 1 (# i)、可変移相子6 (# i)、複屈折板BP (# i) 及びファラデー回転子FR (# i) を含む。

【0086】この可変光学フィルタの全体としての透過率の波長特性は、図22に示される可変光学フィルタの透過率の波長特性と、フィルタユニット14 (#1, ..., #N) のそれぞれの透過率の波長特性との和によって与えられるので、透過率の波長特性を任意に設定するのが容易になる。

【0087】例えば、図24の(A)に示されるように、図23の可変光学フィルタにおいて各々透過率の波長特性を与える3つの特性曲線が得られている場合、全体としての透過率の波長特性は3つの特性曲線の和によって与えられるので、図24の(B)に示されるような所望の透過率の波長特性を得ることができるようにな

る。

【0088】ここでは、各フィルタユニット14（#i）が、特性曲線を波長の軸の方向に変化させるための可変移相子6（#i）と、特性曲線を透過率の軸の方向に変化させるための複屈折板BP（#i）及びファラデー回転子FR（#1）とを有しているとしたが、必要に応じて、可変移相子6（#i）あるいは複屈折板BP（#i）及びファラデー回転子FR（#i）を省略するようにしてもよい。

【0089】次に、可変のファラデー回転角を与えるためのファラデー回転子の具体的構成例について説明する。一般に、磁気光学結晶にある磁界（磁場）を印加した状態で、つまり磁気光学結晶をある磁界の中においた状態で、例えば直線偏光が磁気光学結晶内を通過すると、その偏光方向（直線偏光の電場ベクトルを含む平面の当該伝搬方向と垂直な平面への投影によって与えられる方向）は、直線偏光の伝搬方向に係わらず常に一定の方向に回転される。

【0090】この現象はファラデー回転と称され、偏光方向の回転角の大きさ（ファラデー回転角）は、印加磁界により生じた磁気光学結晶の磁化の方向及び強さに依存する。具体的には、ファラデー回転角は、磁気光学結晶の磁化の強さの光の伝搬方向の成分の大きさによって決定される。

【0091】従って、磁気光学結晶とこの磁気光学結晶に対して光の伝搬方向と同じ方向に磁界を印加する手段とからファラデー回転子を構成すれば、一見すると印加磁界を調整することによりファラデー回転角を有効に調整することができそうである。

【0092】しかし、ここで考慮しておくべき点は、印加磁界の大きさが比較的小さい場合には、印加磁界による磁気光学結晶の磁化の強さが飽和状態に達せず、磁気光学結晶内に多数の磁区が存在していることである。

【0093】このような多数の磁区が存在は、ファラデー回転角の再現性を悪化させるし、良好な再現性が確保されているとしても、ファラデー回転角の連続な可変を困難にする。また、磁気光学結晶に多数の磁区がある場合には、各磁区間の界面における光の散乱による減衰も生じ、実用上の不都合となる。

【0094】そこで、本発明の望ましい実施形態では、可変ファラデー回転子は、光路上に配置される磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第1及び第2磁界をこれらの合成磁界の強さが予め定められた値（例えば磁気光学結晶の磁化の強さが飽和するのに必要とされる磁界の強さに相当する値）よりも大きくなるように磁気光学結晶に対して印加する磁界印加手段と、第1及び第2磁界の強さの少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含む。

【0095】尚、磁気光学結晶において磁化の強さが飽和した状態は、磁区が1つになった状態として理解する

ことができる。望ましくは、第1及び第2磁界は、磁気光学結晶を透過する光の伝搬方向を含む平面内の互いに直交する方向にそれぞれ印加される。

【0096】図25は、本発明に適用可能な可変ファラデー回転子32の一構成例を示す図である。可変ファラデー回転子32は、可変ファラデー回転子FRあるいは可変ファラデー回転子8として用いることができる。

【0097】ファラデー回転子32は、磁気光学結晶41と、磁気光学結晶41に対して互いに直交する方向に磁界を印加する永久磁石42及び電磁石43と、電磁石43に駆動電流を与える可変電流源44とを含む。

【0098】磁気光学結晶41として、薄く切り出したYIG（イットリウム鉄ガーネット）やエピタキシャル結晶成長させた（GdBi）₃（FeAlGa）₅O₁₂等を用いることにより、駆動電流を小さく抑えることができる。

【0099】磁気光学結晶41の厚み方向は例えばY軸と平行であり、この場合、永久磁石42及び電磁石43により磁気光学結晶41に印加される磁界の方向はそれぞれZ軸及びX軸と平行である。符号45は磁気光学結晶41を透過する光ビームを表している。

【0100】図26は、図25に示されるファラデー回転子32において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さ（大きさ）を説明するための図である。

【0101】今、永久磁石42のみによって磁気光学結晶41に磁界ベクトル51が印加されている場合、磁気光学結晶41の磁化ベクトルは符号52で示されるようにZ軸に平行になる。このときの印加磁界の強さ（磁界ベクトル51の長さ）は、磁気光学結晶41の磁化の強さ（磁化ベクトル52の長さ）が飽和するように設定されている。

【0102】そして、例えばこの状態で必要な最大のファラデー回転角が得られているものとする。電磁石43により磁界ベクトル53がX軸に平行に印加されると、合成磁界は、符号54で示されるように磁界ベクトル51及び53の合成ベクトルとなる。この合成磁界54により磁気光学結晶41には磁化ベクトル55が生じる。磁化ベクトル55と磁界ベクトル54は互いに平行であり、磁化ベクトル55の長さは磁化ベクトル52の長さに一致する。

【0103】磁気光学結晶41の磁化の強さが一定であるからといって、磁気光学結晶41が与えるファラデー回転角への磁化の寄与度が同じであるとは限らない。ファラデー回転角が当該磁化の方向と光の伝搬方向との関係にも依存するからである。

【0104】即ち、磁化ベクトル52が生じている状態と磁化ベクトル55が生じている状態とを比較すると、磁化ベクトル52のZ成分（磁化ベクトル52そのものの）に対して磁化ベクトル55のZ成分56が減少して

10

20

30

40

50

いる分だけ、後者のファラデー回転角が小さくなるのである。

【0105】この実施形態によると、ファラデー回転角の可変範囲の全範囲に渡って常に磁気光学結晶41の磁化の強さは飽和することになるので、磁気光学結晶41に多数の磁区が形成されることに起因する不都合が生じない。即ち、ファラデー回転角の再現性が良好になり、ファラデー回転角の連続な可変が可能になる。

【0106】また、可変電流源44から供給される駆動電流を調整することで、ファラデー回転角を連続的に且つ再現性良く変化させることができるので、ファラデー回転子32を本発明に適用することによって、高速動作が可能でしかも信頼性の高い可変光学フィルタの提供が可能になる。

【0107】従って、このような可変ファラデー回転子を本発明に適用することによって、透過率の波長特性の再現性が良く且つ波長特性の連続的な可変が可能な可変光学フィルタの提供が可能になる。

【0108】図27は、本発明に適用可能な他のファラデー回転子32'を示す図である。ファラデー回転子32'が図25に示されるファラデー回転子32と異なる点は、磁気光学結晶41の相対する対角に互いに平行な平面61及び62を形成し、光ビーム63がこれらの平面61及び62を通過するようにしている点である。従って、永久磁石42による磁界の方向と電磁石43による磁界の方向は共に光の伝搬方向(Z軸に平行)に対して概略45°傾斜している。

【0109】図28は、図27に示されるファラデー回転子32'において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さを説明するための図である。

【0110】電磁石43により印加される磁界は、符号71で示される状態から符号72で示される状態の範囲で強さ及び向きを調整可能である。符号73は永久磁石42による印加磁界を示している。

【0111】この場合、合成磁界については、符号74で表される状態と符号75で表される状態の間の範囲でその強さ及び方向が変化する。これに伴い、磁気光学結晶41の磁化についても、符号76で示される状態から符号77で示される状態の範囲でその強さ及び方向が変化する。

【0112】このようなファラデー回転子32を用いると、電磁石43の駆動電流の可変幅をさほど大きくすることなしに、ファラデー回転角の可変範囲を大きくすることができる。

【0113】尚、磁化の強さが最小になる符号78で示される状態(電磁石43による印加磁界が0の状態)で磁気光学結晶41の磁化の強さが十分飽和するように、永久磁石42による印加磁界が設定されている。

【0114】図29は、本発明に適用可能な更に他の可

変ファラデー回転子32''を示す図である。ファラデー回転子32''が図25のファラデー回転子32と異なる点は、図25の永久磁石42に代えて電磁石81を設け、更に電磁石81に駆動電流を与える可変電流源82を設けている点である。

【0115】図30は、図29に示されるファラデー回転子32''において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さを説明するための図である。

10 【0116】図29の実施形態によると、電磁石43及び81による印加磁界を調整することで、合成磁界を符号91乃至94で示すように連続的に且つ飽和磁化を保ったままで変化させることができる。これに伴い、磁気光学結晶41の磁化は符号95乃至98で示されるように連続的に変化する。

【0117】このように図30の実施形態によると、図27に示されるような複雑な形状の磁気光学結晶を用いることなしに、ファラデー回転角の可変範囲を容易に大きくすることができる。

20 【0118】また、ファラデー回転子32''を用いた場合、可変電流源44又は82の極性を切り換えることによって、磁気光学結晶41の磁化のZ成分の向きを変えることができるので、ファラデー回転の方向を必要に応じて変えることができる。例えば、0°を中心として±45n°(nは自然数)の範囲でファラデー回転角を変化させることができる。

【0119】従って、ファラデー回転子32''を本発明に適用することによって、例えば前述したように $\delta = \phi$ 又は $\delta = \theta$ に設定することによって、ファラデー回転角が0°のときに透過率が波長によらず一定となる。例えば、ファラデー回転子32''をシステムに組み込んだ場合、制御オフとなり可変電流源44及び82がオフとなったときに、ファラデー回転角は0°となるので、透過率が波長によらず一定となり、システムの再立ち上げ等が容易になる。

【0120】図31は本発明による可変光学フィルタの第10実施形態を示す図である。この実施形態では、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2としてそれぞれ複屈折物質からなるくさび板121及び122を用いている。これに伴い、光ファイバ123と、光ファイバ123から放射された光をそのビームパラメータを変更して(例えばコリメートして)くさび板121に供給するためのレンズ124と、くさび板122からのビームを集束させるためのレンズ125と、レンズ125により集束された光ビームが所定の条件の下に結合する光ファイバ126とを付加的に設けている。

【0121】くさび板121及び122は、くさび板121の頂部及び底部がそれぞれくさび板122の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置される。即ち、くさび板121及び122は

同じ形状を有している。

【0122】くさび板121の光学軸はY軸に平行であり、くさび板122の光学軸は例えばY軸に平行である。偏光子としてのくさび板121及び122の透過軸は、偏光面が光学軸に平行な異常光線の偏光方向あるいは偏光面が光学軸に垂直な常光線の偏光方向として定義される。

【0123】光ファイバ132の励振端から放射された光は、レンズ124によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号130で表される。ビーム130はくさび板121においてその常光線に相当するビーム131と異常光線に相当するビーム132とに分離される。

【0124】ビーム131及び132は複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRをこの順に通過してそれぞれビーム133及び134になる。ビーム133及び134の偏光状態は、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に応じて決定される。

【0125】ビーム133はくさび板122においてその常光線及び異常光線にそれぞれ相当するビーム135及び136に分離される。ビーム134はくさび板122においてその異常光線及び常光線にそれぞれ相当するビーム137及び138に分離される。

【0126】ビーム135乃至138がそれぞれ受けてきた屈折の履歴並びにくさび板121及び122の形状及び配置形態を考慮すると、ビーム135及び137は互いに平行であり、ビーム136及び138は互いに平行でない。従って、ビーム135及び137だけをレンズ125により絞り込んで光ファイバ126の励振端に結合することができる。

【0127】さて、ビーム135及び137のトータルパワーとビーム136及び138のトータルパワーの比は、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に依存する。例えば、ビーム133及び134がそれぞれビーム131及び132と同じ偏光面を有する直線偏光である場合には、ビーム133及び134のそれぞれ全部がビーム135及び137に変換される。

【0128】また、ビーム133及び134がそれぞれビーム131及び132の偏光面に直交する偏光面を有する直線偏光である場合には、ビーム133及び134はそれぞれ全部ビーム136及び138に変換される。

【0129】一方、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が一定である状態においては、ビーム135及び137のトータルパワーは、ビーム130の偏光状態に依存しない。ビーム135及び137のトータルパワーがそれらの波長に依存することはこれまでの説明から明らかである。

【0130】従って、この実施形態によると、可変光学フィルタの透過率が入力光の偏光状態に依存しないようにすることができる。即ち、偏光無依存の可変光学フィ

ルタの提供が可能になる。

【0131】図32は本発明による可変光学フィルタの第1実施形態を示す図である。ここでは、第1の偏光子P1として複屈折物質からなるくさび板141が用いられ、第2の偏光子P2として複屈折物質からなる2つのくさび板142及び143が用いられている。

【0132】くさび板141の頂部及び底部はそれぞれくさび板142の底部及び頂部に対向し、くさび板143の頂部及び底部はそれぞれくさび板142の底部及び頂部に対向している。

【0133】そして、くさび板141、142及び143のくさび角をそれぞれ θ_1 、 θ_2 及び θ_3 とし、くさび板141及び142間の距離を d_1 とし、くさび板142及び143間の距離を d_2 とするとときに、次の2つの式を満足するように各くさび板が作製され配置されている。

【0134】

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_3, \quad d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_3$$

くさび板141の光学軸はY軸に平行であり、くさび板142及び143の光学軸は互いに平行である。くさび板142及び143の光学軸は例えばY軸に平行である。

【0135】図31の実施形態では、くさび板121及び122間に複屈折板BP及びファラデー回転子FRを設けるためにくさび板121及び122間の距離を比較的大きくせざるを得ない。従って、ビーム135及び137間の距離も比較的大きくなり、レンズ125の球面収差等の収差の影響を受けやすくなる。

【0136】図32の実施形態による場合、レンズ124からのビームをくさび板141で偏光分離してくさび板142及び143により偏光合成したときに、くさび板143から出力する常光線成分及び異常光線成分の光路はほぼ一致するので、これらをレンズ125によりその収差の影響をほとんど受けることなしに効率よく光ファイバ126に入射させることができる。

【0137】図33は本発明による可変光学フィルタの第2実施形態を示す図である。ここでは、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2としてそれぞれ複屈折物質からなる平板151及び152が用いられている。

【0138】平板151及び152の厚みは等しい。平板151及び152の光学軸は、例えば、互いに直交し且つ各光学軸がそれぞれZ軸に対して 45° 傾斜するように設定されている。

【0139】偏光子としての平板151及び152の各々の透過軸は、偏光面が光学軸に平行な異常光線の偏光方向あるいは偏光面が光学軸に垂直な常光線の偏光方向として定義される。光ファイバ123の励振端から放射された光は、レンズ124によりそのビームパラメータを変更されて、例えば収束しつつあるビーム160になる。ビーム160は平板151においてその常光線及び

異常光線にそれぞれ相当するビーム161及び162に分離される。ビーム161及び162は互いに平行である。

【0140】ビーム161及び162は、複屈折板BP及びファラデー回転子FRをこの順に通過してそれぞれビーム163及び164になる。ビーム163及び164の偏光状態はファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に応じて決定される。

【0141】ビーム163は平板152においてその常光線及び異常光線に相当するビーム165及び166に分離される。ビーム164は平板152においてその常光線及び異常光線に相当するビーム167及び168に分離される。

【0142】平板151及び152は互いに平行でありこれらのZ軸方向の厚みは等しいので、ビーム165はビーム168に一致する。従って、ビーム165及び168だけをレンズ125により絞り込んで光ファイバ126に入射させることができる。

【0143】さて、ビーム165及び168のトータルパワーとビーム166及び167のトータルパワーの比は、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に依存する。

【0144】一方、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が一定である状態においては、ビーム165及び168のトータルパワーは、ビーム160の偏光状態には依存しない。ビーム165及び168のトータルパワーがそれらの波長に依存することはこれまでの説明から明らかである。

【0145】従って、この実施形態によっても、偏光無依存の可変光学フィルタの提供が可能になる。尚、各偏光子として複屈折物質からなる平板を用いる場合には、 $1/2$ 波長板を付加的に設けることにより種々の配置形態を採用することができる。

【0146】図34の(A)及び(B)は本発明による可変光学フィルタの第13実施形態を説明するための図である。図34の(A)に示されているのは、図31の第10実施形態に対応しており、図34の(B)に示されているが第13実施形態である。

【0147】図34の(A)では、くさび板121及び122の各々の偏光分離角度あるいはくさび角は θ' であり、ビーム135及び137はレンズ125により光ファイバ126に結合するのに対してビーム136及び138は光ファイバ126には結合しない。

【0148】ここで、図34の(B)に示されるように、各々角 θ' よりも小さい角 θ'' を有するくさび板121'及び122'を用いるものとする。このとき、くさび板122'からはビーム135'乃至138'が出力している。ビーム135'及び137'は原理的には全部レンズ125により光ファイバ126に結合する。ここでは、角 θ'' が角 θ' よりも小さいことにより、本

来光ファイバ126に結合させることが予定されていないビーム136'及び138'の一部も光ファイバ126に結合するかも知れない。もしそうであれば、第2の偏光子P2として部分偏光子を用いたのと同様の効果が生じることとなる。

【0149】ビーム136'及び138'の一部が光ファイバ126に結合する条件は、光ファイバ126のコア径を a 、レンズ125の焦点距離を f とするとときに、 $a > f \sin \theta''$ で与えられる。

10 【0150】この条件を満足することにより、第2の偏光子P2として部分偏光子を用いたのと同じように、可変光学フィルタの平均損失を小さくすることができる。以上、本発明を種々の実施形態に基づいて説明したが、これまでの実施形態の2つ又はそれ以上を組み合わせる本発明を実施してもよい。

【0151】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、透過率の波長特性を与える特性直線の形状が透過率の軸の方向に変化するような可変光学フィルタの提供が可能になるという効果が生じる。本発明による他の効果は以上の説明から明らかである。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は複屈折フィルタ（従来技術）の説明図である。

【図2】図2の(A)及び図2の(B)は従来の可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。

【図3】図3の(A)及び図3の(B)は要求されている可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。

30 【図4】図4は図1に示される複屈折フィルタの部材間の位置関係を示す図である。

【図5】図5は一次関数で近似された $(1/\lambda)$ の説明図である。

【図6】図6は図4で定義される θ を変化させたときの透過率の波長特性の変化を示す図である。

【図7】図7の(A)及び図7の(B)はそれぞれ本発明による可変光学フィルタの第1及び第2実施形態を示す図である。

40 【図8】図8は本発明による可変光学フィルタの各実施形態における部材間の位置関係を示す図である。

【図9】図9は透過率の波長特性の第1の例を示すグラフである。

【図10】図10は損失傾斜の説明図である。

【図11】図11は透過率の波長特性の第2の例を示すグラフである。

【図12】図12の(A)及び図12の(B)は透過率の波長特性の第3の例を示すグラフである。

【図13】図13は透過率の波長特性の第4の例を示すグラフである。

50 【図14】図14の(A)及び図14の(B)はそれぞ

れ本発明による可変光学フィルタの第3及び第4実施形態を示す図である。

【図15】図15は透過率の波長特性の第5の例を示すグラフである。

【図16】図16は透過率の波長特性の第6の例を示すグラフである。

【図17】図17は本発明による可変光学フィルタの第5実施形態を示す図である。

【図18】図18は透過率の波長特性の第7の例を示す図である。

【図19】図19は本発明による可変光学フィルタの第6実施形態を示す図である。

【図20】図20は透過率の波長特性の第8の例を示す図である。

【図21】図21は本発明による可変光学フィルタの第7実施形態を示す図である。

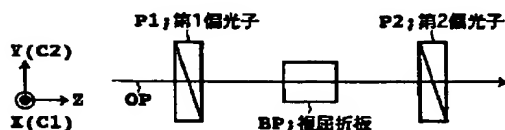
【図22】図22は本発明による可変光学フィルタの第8実施形態を示す図である。

【図23】図23は本発明による可変光学フィルタの第9実施形態を示す図である。

【図24】図24の(A)及び図24の(B)は図23に示される可変光学フィルタによる得られる透過率の波長特性の例を示すグラフである。

【図25】図25は本発明に適用可能なファラデー回転子を示す図である。

【図1】

複屈折フィルタの説明図
(従来技術)

【図26】図26は図25における磁界及び磁化の説明図である。

【図27】図27は本発明に適用可能な他のファラデー回転子を示す図である。

【図28】図28は図27における磁界及び磁化の説明図である。

【図29】図29は本発明に適用可能な更に他のファラデー回転子を示す図である。

【図30】図30は図29における磁界及び磁化の説明図である。

【図31】図31は本発明による可変光学フィルタの第10実施形態を示す図である。

【図32】図32は本発明による可変光学フィルタの第11実施形態を示す図である。

【図33】図33は本発明による可変光学フィルタの第12実施形態を示す図である。

【図34】図34の(A)は図31に対応する可変光学フィルタを示す図であり、図34の(B)は本発明による可変光学フィルタの第13実施形態を示す図である。

20 【符号の説明】

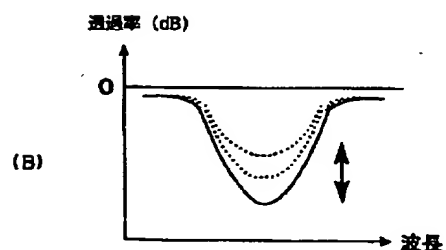
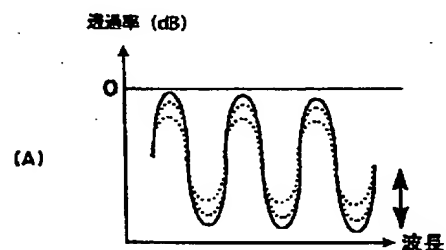
P1 第1の偏光子

P2 第2の偏光子

BP 複屈折板

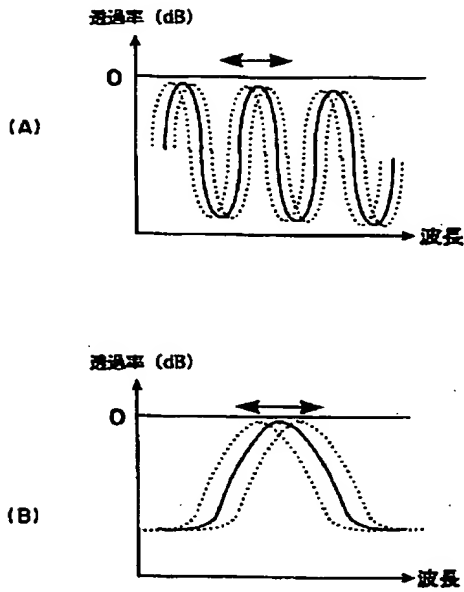
FR 可変ファラデー回転子

【図3】

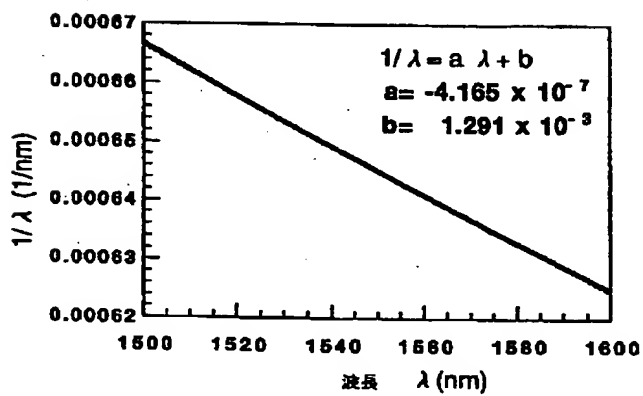
要求されている可変光学フィルタの
特性の例を説明するための図

【図2】

従来の可変光学フィルタの特性の例を説明するための図

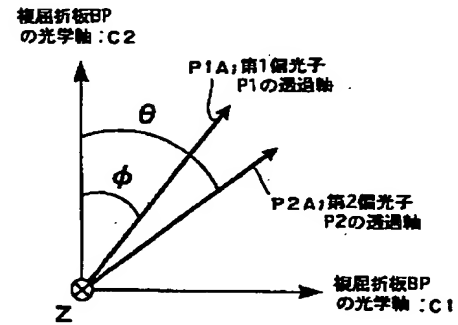


【図5】

一次関数で近似された $(1/\lambda)$ の説明図

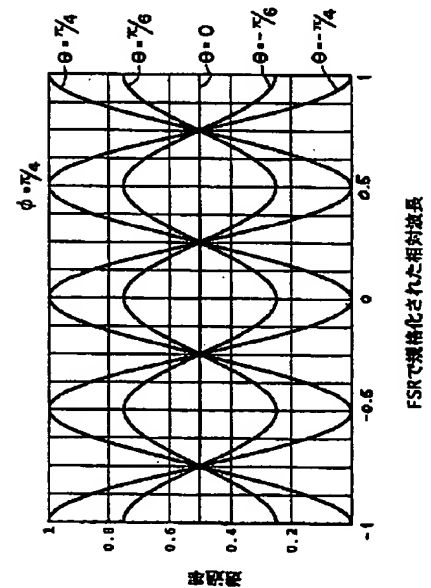
【図4】

図1の複屈折フィルタの部材間の位置関係を示す図



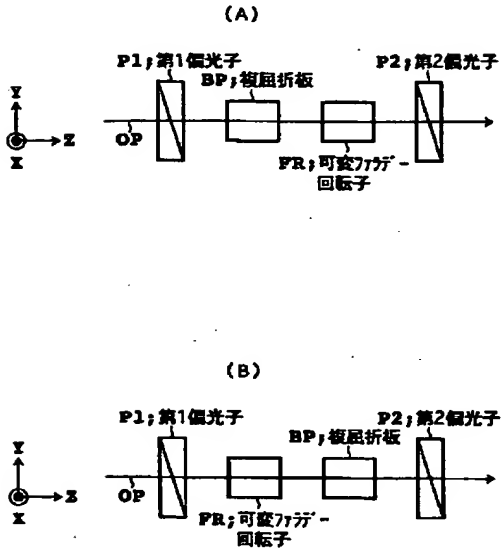
【図6】

図4で定義されるθを変化させたときの透過率の波長特性の変化を示す図



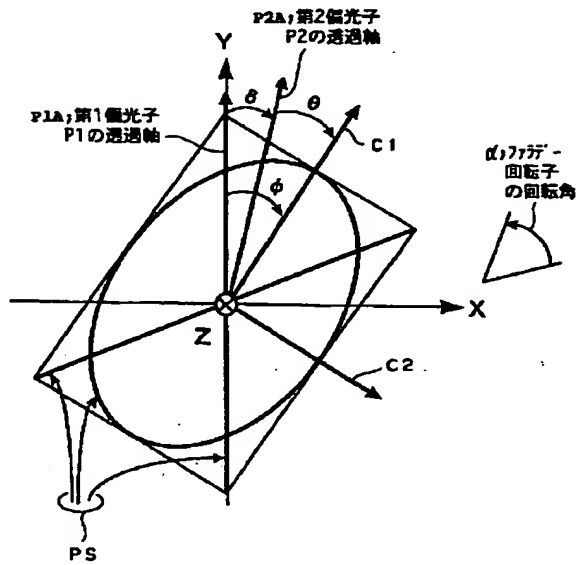
【図7】

可変光学フィルタの
第1及び第2実施形態を示す図



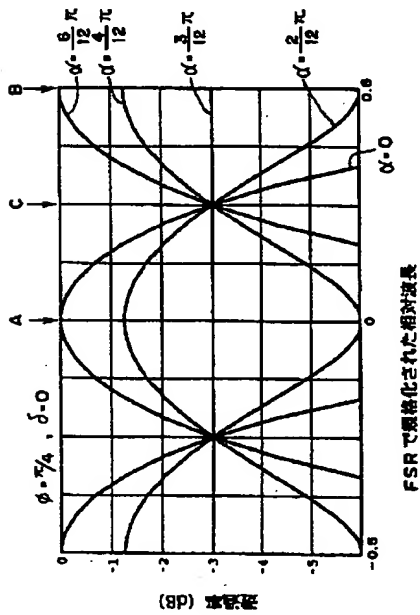
【図8】

可変光学フィルタの各実施形態における
部材間の位置関係を示す図



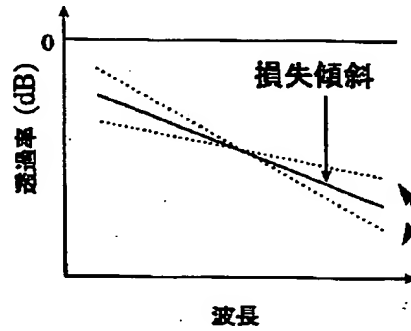
【図9】

透過率の波長特性の第1の例を示すグラフ



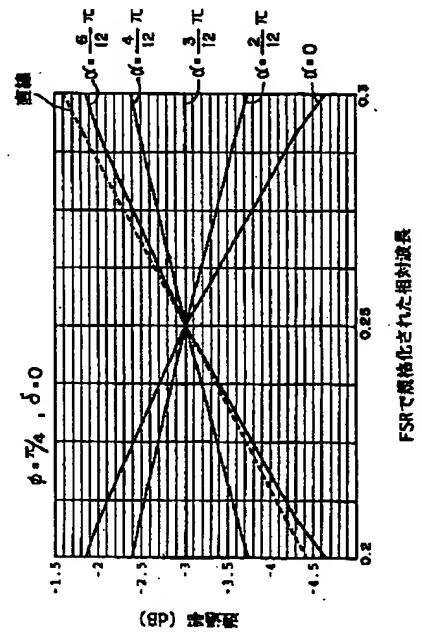
【図10】

損失傾斜の説明図

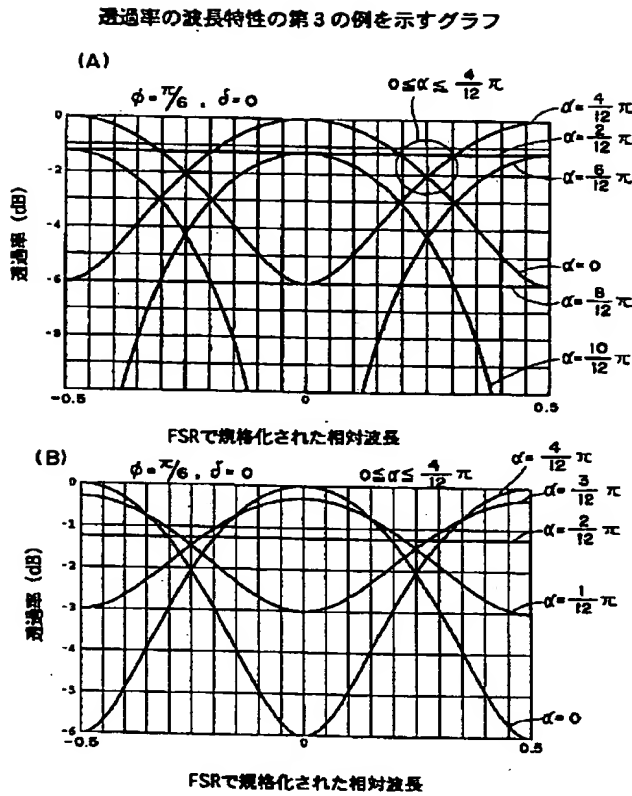


【図11】

透過率の波長特性の第2の例を示すグラフ

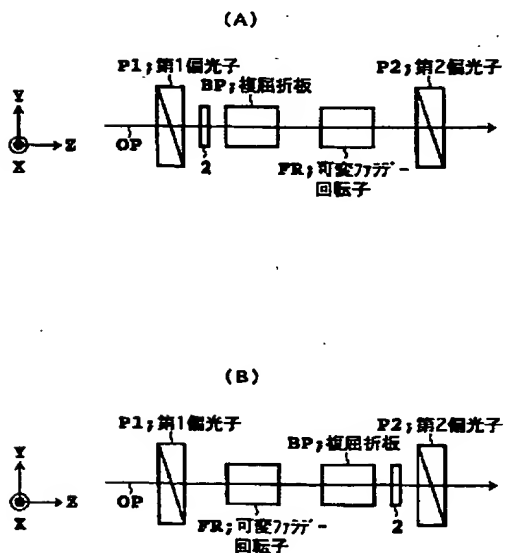


【図12】



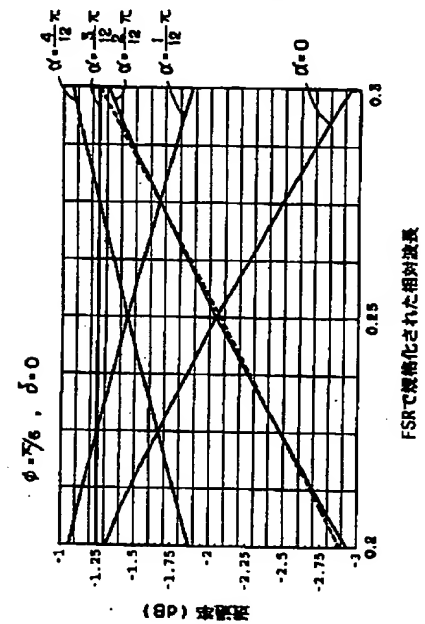
【図14】

可変光学フィルタの
第3及び第4実施形態を示す図



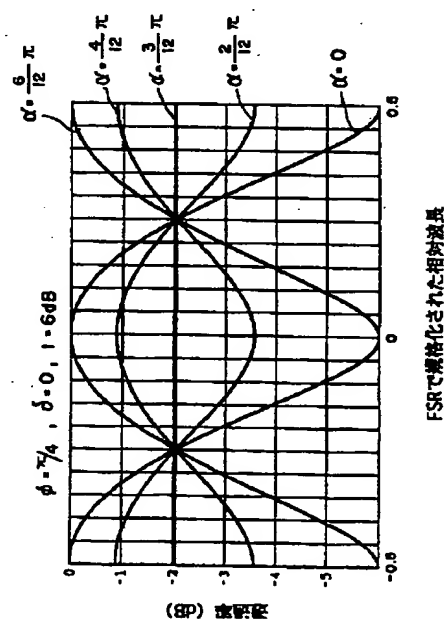
【図13】

透過率の波長特性の第4の例を示すグラフ



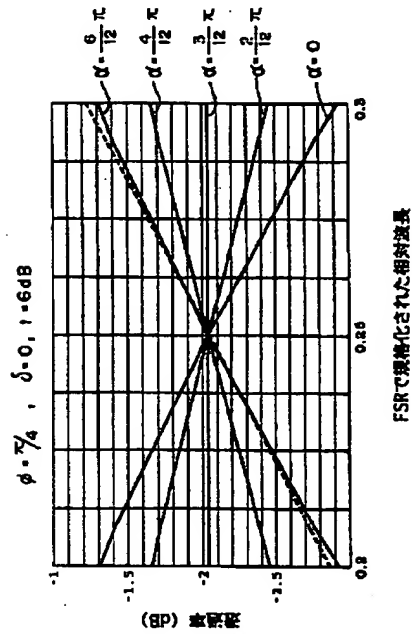
【図15】

透過率の波長特性の第5の例を示すグラフ



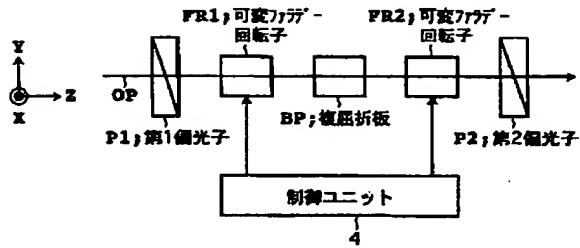
【図16】

透過率の波長特性の第6の例を示すグラフ



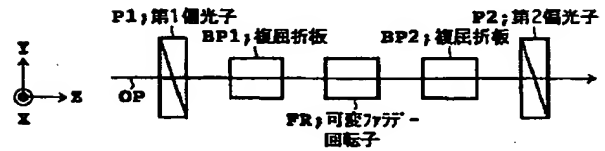
【図17】

可変光学フィルタの第5実施形態を示す図



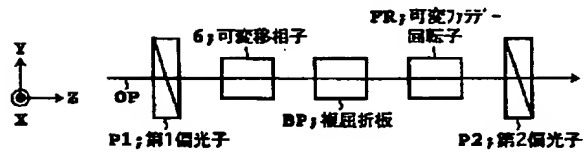
【図19】

可変光学フィルタの第6実施形態を示す図



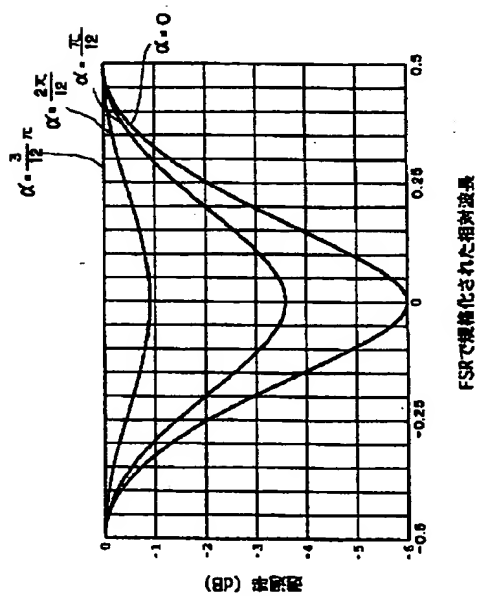
【図21】

可変光学フィルタの第7実施形態を示す図



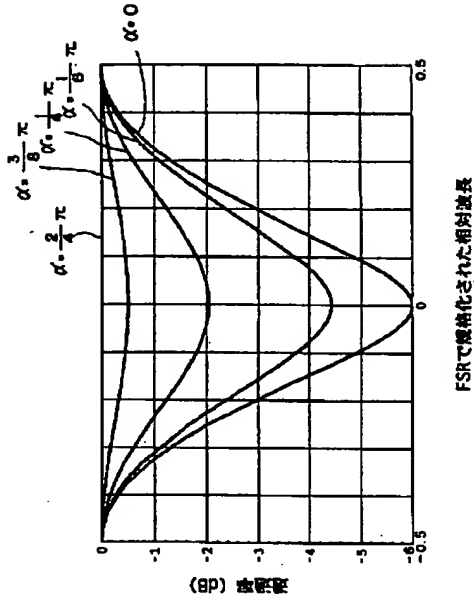
【図18】

透過率の波長特性の第7の例を示すグラフ



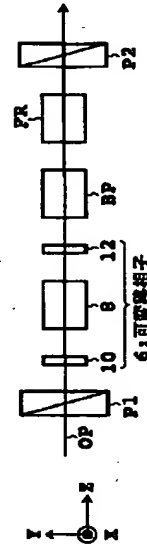
【図20】

透過率の波長特性の第8の例を示すグラフ



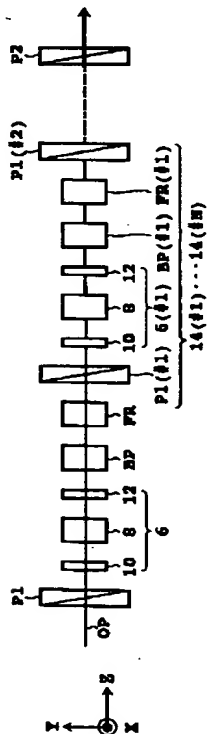
【図22】

可変光学フィルタの第8実施形態を示す図



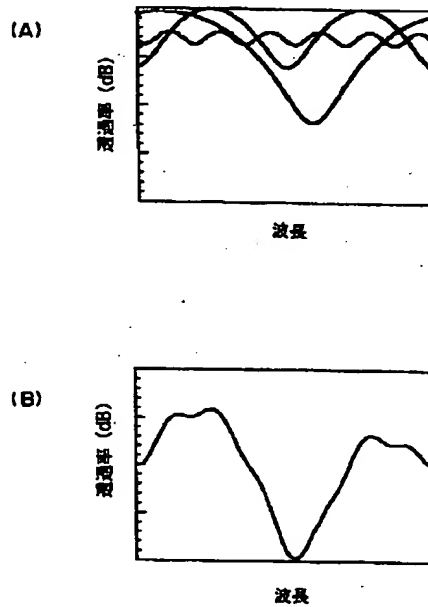
【図23】

可変光学フィルタの第9実施形態を示す図



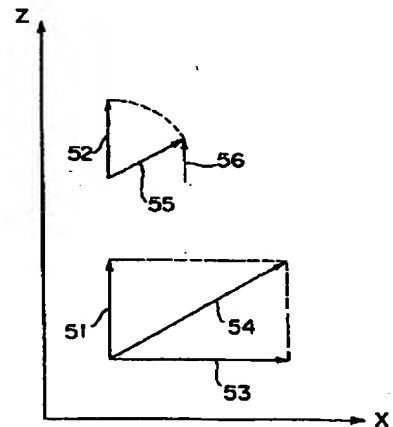
【図24】

図23に示される可変光学フィルタにより得られる透過率の波長特性の例を示すグラフ



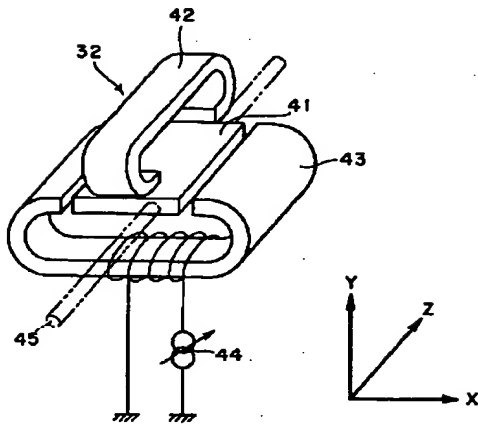
【図26】

図25における磁界及び磁化の説明図



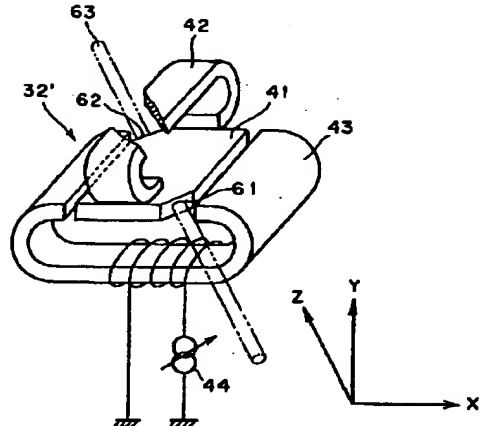
【図 25】

本発明に適用可能な
ファラデー回転子を示す図



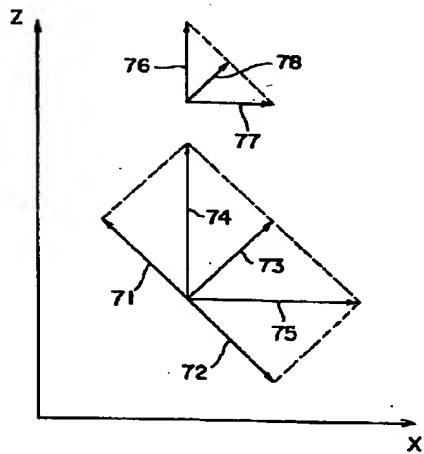
【図 27】

本発明に適用可能な
他のファラデー回転子を示す図



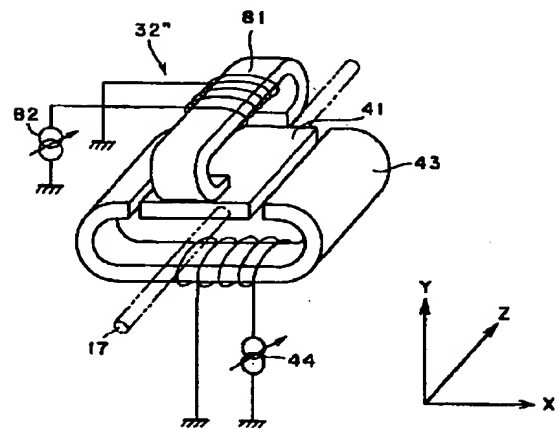
【図 28】

図 27 における磁界及び磁化の説明図



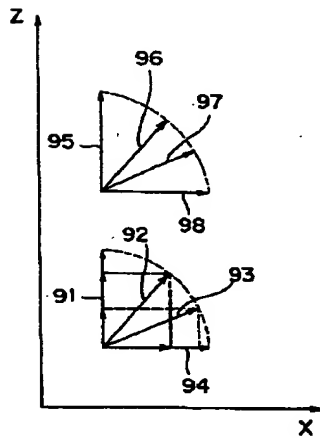
【図 29】

本発明に適用可能な
更に他のファラデー回転子を示す図



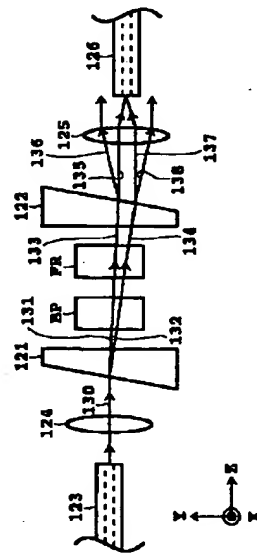
【図30】

図29における磁界及び磁化の説明図



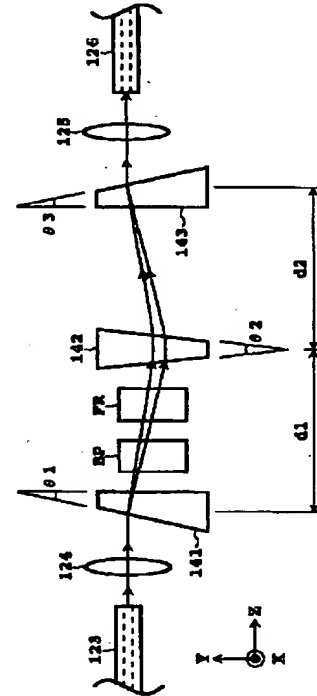
【図31】

可変光学フィルタの第10実施形態を示す図



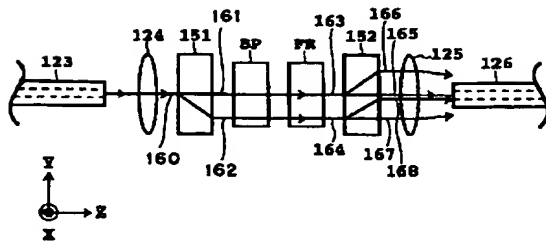
【図32】

可変光学フィルタの第11実施形態を示す図



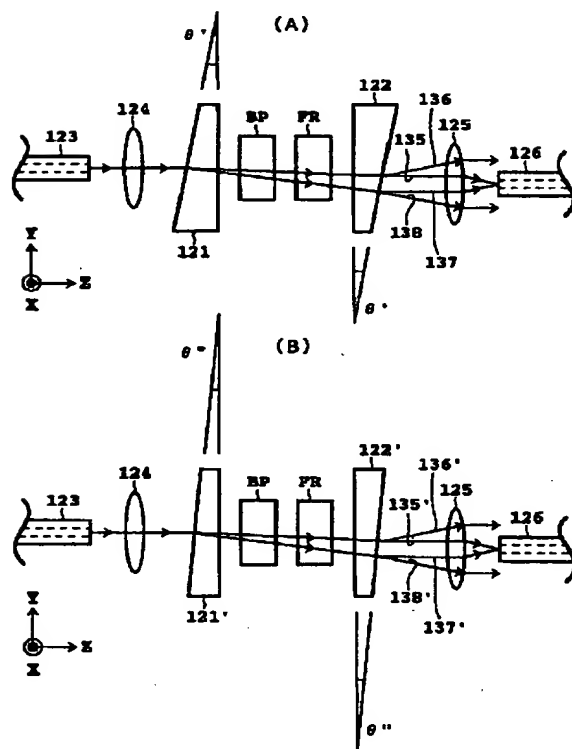
【図33】

可変光学フィルタの第12実施形態を示す図



【図 34】

可変光学フィルタの第13実施形態を示す図



TUNABLE OPTICAL FILTER

BACKGROUND OF THE INVENTION

Field of the Invention

The present invention relates generally to a tunable optical filter applicable to a system such as an optical fiber communication system, and more particularly to a tunable optical filter in which the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a transmittance axis.

Description of the Related Art

In recent years, a manufacturing technique and using technique for a low-loss (e.g., 0.2dB/km) optical fiber have been established, and an optical fiber communication system using the optical fiber as a transmission line has been put to practical use. Further, to compensate for losses in the optical fiber and thereby allow long-haul transmission, the use of an optical amplifier for amplifying signal light has been proposed or put to practical use.

An optical amplifier known in the art includes an optical amplifying medium to which signal light to be amplified is supplied and means for pumping the optical amplifying medium so that the optical amplifying medium

provides a gain band including the wavelength of the signal light. For example, an erbium doped fiber amplifier (EDFA) includes an erbium doped fiber (EDF) as the optical amplifying medium and a pumping light source for supplying pump light having a predetermined wavelength to the EDF. By preliminarily setting the wavelength of the pump light within a $0.98\mu\text{m}$ band or a $1.48\mu\text{m}$ band, a gain band including a wavelength of $1.55\mu\text{m}$ can be obtained. Further, another type optical amplifier having a semiconductor chip as the optical amplifying medium is also known. In this case, the pumping is performed by injecting an electric current into the semiconductor chip.

As a technique for increasing a transmission capacity by a single optical fiber, wavelength division multiplexing (WDM) is known. In a system adopting WDM, a plurality of optical carriers having different wavelengths are used. The plural optical carriers are individually modulated to thereby obtain a plurality of optical signals, which are wavelength division multiplexed by an optical multiplexer to obtain WDM signal light, which is output to an optical fiber transmission line. On the receiving side, the WDM signal light received is separated into individual optical signals by an optical demultiplexer, and transmitted data is reproduced according to each optical

signal. Accordingly, by applying WDM, the transmission capacity in a single optical fiber can be increased according to the number of WDM channels.

In the case of incorporating an optical amplifier into a system adopting WDM, a transmission distance is limited by a gain characteristic (wavelength characteristic of gain) which is often called as a gain tilt. For example, in an EDFA, a gain deviation is produced at wavelengths in the vicinity of $1.55\mu\text{m}$. When a plurality of EDFAs are cascaded to cause accumulation of gain tilts, an optical SNR (signal-to-noise ratio) in a channel included in a band giving a small gain is degraded.

To cope with the gain tilt of an optical amplifier, a gain equalizer may be used. Before a degradation in optical SNR in a certain channel becomes excessive due to accumulation of gain tilts, gain equalization is performed by the gain equalizer provided at a suitable position.

A tunable optical filter is known as an optical device usable as the gain equalizer. In the tunable optical filter, a wavelength characteristic of transmittance (or loss) (wavelength dependence of transmittance) is variable. For example, the wavelength characteristic of the tunable optical filter is set or controlled so as to cancel the gain tilt of an optical

amplifier, thereby reducing an interchannel deviation of powers of optical signals at the receiving end.

Conventionally known is a tunable optical filter having a mechanically movable part. In this kind of tunable optical filter, for example, an angle of incidence of a light beam on an optical interference film or a diffraction grating is mechanically changed, thereby changing a center wavelength in a transmission band or a center wavelength in a rejection band. That is, the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a wavelength axis. Further, a tunable optical filter provided by Photonics Technologies, Inc. applies a split-beam Fourier filter as the basic principles to make variable not only the center wavelength, but a rejection quantity (transmittance) itself by mechanical means. That is, the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance is variable not only along the wavelength axis, but along a transmittance axis.

Further, as a tunable optical filter capable of changing a wavelength characteristic of loss by electrical means without using any mechanically movable part, a waveguide type Mach-Zehnder (MZ) optical filter and an acousto-optic tunable filter (AOTF) are known, for example.

Further, an optical bandpass filter capable of varying a center wavelength applying a birefringent filter as the basic principles has been proposed (Japanese Patent Laid-open Publication No. 6-130339).

The tunable optical filter having a mechanically movable part has defects such that high-speed operation is difficult and reliability is lacking. Further, the MZ optical filter and the AOTF at present have defects such that (1) a drive voltage is high, (2) a power consumption is large, (3) a temperature stabilizing device is required to cause an unavoidable enlargement of scale, and (4) reliability cannot be obtained.

It is therefore desired to design a tunable optical filter that can satisfy such conditions that (1) no mechanically movable part is included to obtain high reliability, (2) the filter is controllable by electrical means, and (3) a drive voltage is low and a power consumption is small.

As a candidate for the tunable optical filter satisfying these conditions, a tunable optical filter described in Japanese Patent Laid-open Publication No. 6-130339 is noticeable. This tunable optical filter has a variable Faraday rotator for giving a variable Faraday rotation angle, in which the shape of a characteristic

curve giving a wavelength characteristic of transmittance is changed along the wavelength axis according to a change in the Faraday rotation angle. However, the shape of the characteristic curve cannot be changed along the transmittance axis. In the prior applications of the gain equalizer, for example, it is required that a loss depth in a rejection band is variable, it therefore cannot be said that this tunable optical filter always have a sufficient performance as a gain equalizer.

SUMMARY OF THE INVENTION

It is therefore an object of the present invention to provide a tunable optical filter in which the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along the transmittance axis. The other objects of the present invention will become apparent from the following description.

In accordance with an aspect of the present invention, there is provided a tunable optical filter comprising first and second polarizers, a birefringent element, and a Faraday rotator. Each of the first and second polarizers has a transmission axis determining a polarization axis of transmitted polarized light. The birefringent element is provided between the first and

second polarizers to give a phase difference between two orthogonal components of transmitted polarized light. The phase difference is determined by an optic axis of the birefringent element. The Faraday rotator is provided between the first and second polarizers to give a variable Faraday rotation angle to transmitted polarized light. The order of arrangement of the birefringent element and the Faraday rotator and the relative positional relation between the optic axis of the birefringent element and the transmission axis of each of the first and second polarizers are, for example, set so that the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a transmittance axis according to a change in the Faraday rotation angle.

With this configuration, the order of arrangement and the relative positional relation are set in a specific manner, so that the shape of the characteristic curve is variable along the transmittance axis, thus, a loss depth in a rejection band can be changed, thereby achieving one of the objects of the present invention.

In the present specification, the term of "transmittance" is defined as a power transmittance.

The above and other objects, features and advantages of the present invention and the manner of

realizing them will become more apparent, and the invention itself will best be understood from a study of the following description and appended claims with reference to the attached drawings showing some preferred embodiments of the invention.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

FIG. 1 is a view for illustrating a birefringent filter in the prior art;

FIGS. 2A and 2B are graphs for illustrating a characteristic of a tunable optical filter in the prior art;

FIGS. 3A and 3B are graphs for illustrating a characteristic of a tunable optical filter required;

FIG. 4 is a view showing a positional relation among members of the birefringent filter shown in FIG. 1;

FIG. 5 is a graph for illustrating $(1/\lambda)$ approximated by a linear function;

FIG. 6 is a graph showing a change in wavelength characteristic of transmittance with a change in an angle θ defined in FIG. 4;

FIGS. 7A and 7B are views showing first and second preferred embodiments of the tunable optical filter according to the present invention respectively;

FIG. 8 is a view showing a positional relation among members of each preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 9 is a graph showing a first example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIG. 10 is a graph for illustrating loss tilt;

FIG. 11 is a graph showing a second example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIGS. 12A and 12B are graphs showing a third example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIG. 13 is a graph showing a fourth example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIGS. 14A and 14B are views showing third and fourth preferred embodiments of the tunable optical filter according to the present invention respectively;

FIG. 15 is a graph showing a fifth example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIG. 16 is a graph showing a sixth example of the wavelength characteristic of transmittance in the present

invention;

FIG. 17 is a view showing a fifth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 18 is a graph showing a seventh example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIG. 19 is a view showing a sixth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 20 is a graph showing an eighth example of the wavelength characteristic of transmittance in the present invention;

FIG. 21 is a view showing a seventh preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 22 is a view showing an eighth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 23 is a view showing a ninth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIGS. 24A and 24B are graphs showing an example of the wavelength characteristic of transmittance obtained by

the tunable optical filter shown in FIG. 23;

FIG. 25 is a view showing a Faraday rotator applicable to the present invention;

FIG. 26 is a view for illustrating magnetic fields and magnetization in FIG. 25;

FIG. 27 is a view showing another Faraday rotator applicable to the present invention;

FIG. 28 is a view for illustrating magnetic fields and magnetization in FIG. 27;

FIG. 29 is a view showing still another Faraday rotator applicable to the present invention;

FIG. 30 is a view for illustrating magnetic fields and magnetization in FIG. 29;

FIG. 31 is a view showing a tenth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 32 is a view showing an eleventh preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 33 is a view showing a twelfth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention;

FIG. 34A is a view showing a tunable optical filter corresponding to that shown in FIG. 31; and

FIG. 34B is a view showing a thirteenth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention.

DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

Some preferred embodiments of the present invention will now be described in detail with reference to the attached drawings.

A birefringent filter will first be described with reference to FIG. 1 because it is considered useful in understanding the configuration and operation of the tunable optical filter according to the present invention. The birefringent filter shown in FIG. 1 is configured by arranging a first polarizer P1, a birefringent plate BP, and a second polarizer P2 in this order on an optical path OP. An orthogonal three-dimensional coordinate system (X, Y, Z) having a Z axis parallel to the optical path OP is adopted herein. It is assumed that the X axis and the Y axis are parallel to the optic axes (C1 axis and C2 axis) of the birefringent plate BP respectively, and the angle formed between the transmission axis of the first polarizer P1 and the Y axis is 45° . The angle formed between the transmission axis of the second polarizer P2 and the Y axis is arbitrary. "The transmission axis of a polarizer" points

in a direction of vibration of linearly polarized light transmitted through the polarizer, and it is generally defined as an axis determining the polarization axis of polarized light transmitted through the polarizer.

When linearly polarized light transmitted through the first polarizer P1 enters the birefringent plate BP, the linearly polarized light is separated into a component having a polarization plane parallel to the C1 axis and a component having a polarization plane parallel to the C2 axis, and these two components propagate in the birefringent plate BP. Upon output from the birefringent plate BP, these two components are combined at a phase difference determined according to wavelength. In the case that the thickness of the birefringent plate BP is sufficiently larger than the wavelength of incident light, the polarization state of the light combined at the output of the birefringent plate BP differs based on wavelength. That is, the combined light can be linearly polarized light, or circularly, or elliptically polarized light according to wavelength. The transmittance of the second polarizer P2 depends on the polarization state of light incident on the second polarizer P2, and therefore differs according to wavelength. For example, assuming that the transmission axis of the second polarizer P2 is fixed so as

to be parallel to linearly polarized light having a certain wavelength, the transmittance of the second polarizer P2 to the light of this wavelength is 100% in principle. At another wavelength, the transmittance of the second polarizer P2 to linearly polarized light perpendicular to the transmission axis of the second polarizer P2 is 0% in principle. Further, the transmittance of the second polarizer P2 to circularly polarized light having another wavelength is 50% in principle, and the transmittance of the second polarizer P2 to elliptically polarized light having another wavelength varies according to the ellipticity of the elliptically polarized light. Thus, the transmittance of this birefringent filter varies depending upon the wavelength of incident light.

FIGS. 2A and 2B are graphs for illustrating a characteristic of a conventional tunable optical filter. In the tunable optical filter described in Japanese Patent Laid-open Publication No. 6-130339, for example, a phase shifter including a Faraday rotator and two quarter-wave plates is provided in place of the birefringent plate BP of the birefringent filter shown in FIG. 1, thereby obtaining a wavelength characteristic such that the transmittance periodically changes with wavelength. As shown by solid and broken lines in FIG. 2A, a characteristic curve giving

this wavelength characteristic is variable in shape along the wavelength axis. Accordingly, by using this tunable optical filter, it is possible to provide an optical bandpass filter whose characteristic curve is variable in shape along the wavelength axis as shown in FIG. 2B.

FIGS. 3A and 3B are graphs for illustrating a characteristic of a tunable optical filter required by the present invention. In FIG. 2A, the shape of the characteristic curve is variable along the wavelength axis. In contrast therewith, the tunable optical filter required by the present invention has a characteristic curve whose shape is variable along the transmittance axis as shown in FIG. 3A. More specifically, in consideration of use as a gain equalizer, it is required to realize a notch filter in which a loss depth in a rejection band is variable as shown as an example in FIG. 3B.

Now, quantitative analysis will be made on the birefringent filter shown in FIG. 1 and next developed into showing a method for providing a tunable optical filter having such a characteristic as shown in FIGS. 3A and 3B. It is now assumed that in the birefringent filter shown in FIG. 1 the transmission axis P1A of the first polarizer P1, the optic axes (C1 axis and C2 axis) of the birefringent plate BP, and the transmission axis P2A of the second

polarizer P2 are in positional relation to each other as shown in FIG. 4. That is, let ϕ denote the angle formed between the transmission axis P1A and the C2 axis and θ denote the angle formed between the transmission axis P2A and the C2 axis.

When linearly polarized light $\sin(\omega t)$ enters the birefringent filter in a direction parallel to the transmission axis P1A, a component E1 of transmitted light through the birefringent plate BP parallel to the C1 axis and a component E2 of the transmitted light parallel to the C2 axis can be expressed as follows:

$$E1 = \sin\phi \sin(\omega t + \epsilon_1)$$

$$E2 = \cos\phi \sin(\omega t + \epsilon_2)$$

where ϵ_1 and ϵ_2 are the phase delays of the components E1 and E2 respectively. The amplitude of light emerging from the second polarizer P2 is given as follows:

$$\begin{aligned} & E1\sin\theta + E2\cos\theta \\ &= \sin\phi \sin\theta \sin(\omega t + \epsilon_1) + \cos\phi \cos\theta \sin(\omega t + \epsilon_2) \\ &= (\sin\phi \sin\theta \cos\epsilon_1 + \cos\phi \cos\theta \cos\epsilon_2) \sin\omega t + \\ & \quad (\sin\phi \sin\theta \sin\epsilon_1 + \cos\phi \cos\theta \sin\epsilon_2) \cos\omega t \end{aligned}$$

Accordingly, the intensity I of transmitted light is given as follows:

$$I = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2((\epsilon_1 - \epsilon_2)/2)$$

Letting d denote the thickness of the birefringent plate

BP, μ denote the refractive index difference between an ordinary ray and an extraordinary ray in the birefringent plate BP, and λ denote the wavelength, the following equation holds.

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2) / 2 = \pi \mu d / \lambda$$

Accordingly, the intensity I of transmitted light can be expressed as a function $I(\lambda)$ of wavelength λ to give Eq. (1).

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \mu d / \lambda) \dots (1)$$

As understood from Eq. (1), the transmitted light intensity has wavelength dependence and periodically changes with wavelength. If the value of wavelength λ is higher than an actually operating wavelength band, $1/\lambda$ can be approximated by a linear function as follows:

$$1/\lambda = a\lambda + b$$

If the wavelength band is set to a range of 1500nm to 1600nm as shown in FIG. 5, for example, $a = -4.165 \times 10^{-7} \text{ (1/nm}^2\text{)}$ and $b = 1.291 \times 10^{-3} \text{ (1/nm)}$.

Neglecting b and considering only a relative wavelength, Eq. (1)' is given.

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \lambda / \text{FSR}) \dots (1)'$$

where FSR (Free Spectral Range) represents a wavelength

period in a wavelength characteristic of transmittance, and it is expressed as follows:

$$\text{FSR} = 1 / \mu d \quad \dots (2)$$

Accordingly, it is understood that a required FSR can be obtained by adjusting the thickness d of the birefringent plate BP provided that the refractive index difference μ determined by the material of the birefringent plate BP is constant.

Eq. (1) shows that the transmitted light intensity changes with a change in angle ϕ and/or angle θ . Referring to FIG. 6, there is shown a change in wavelength characteristic of transmittance in the case that the angle θ is changed with the angle ϕ fixed to $\pi/4$ (45°), for example. In FIG. 6, the vertical axis represents transmittance (true value) and the horizontal axis represents relative wavelength normalized by FSR. The signs attached to the values of the angle θ having positive and negative value are intended to show relative rotational directions between the C2 axis and the transmission axis P2A, which will be hereinafter described in detail.

A direct method for changing the angle θ is to rotate the transmission axis P2A of the second polarizer P2. In present techniques, any polarizer capable of

rotating its transmission axis without using mechanical means is not known. Although a polarizer capable of rotating its transmission axis can be provided by using mechanical means, a tunable optical filter having a mechanically movable part has problems such that high-speed operation is difficult and reliability is lacking. In view of this fact, the present invention has proposed a method using a variable Faraday rotator as will be hereinafter described in detail.

The angle θ is an angle formed between the transmission axis P2A of the second polarizer P2 and the C2 axis, and it can be said that the angle θ is an angle formed between the polarization axis of light incident on the second polarizer P2 and the transmission axis P2A of the second polarizer P2. In other words, "rotating the transmission axis P2A of the second polarizer P2" is substantially the same as "rotating the polarization axis of light incident on the second polarizer P2".

Accordingly, by locating a Faraday rotator for giving a variable Faraday rotation angle between the birefringent plate BP and the second polarizer P2, and by rotating an azimuth of polarized light incident on the second polarizer P2, the same condition as that obtained by changing the angle θ can be realized, and the transmitted light

intensity can therefore be changed according to the rotation of the azimuth.

Similarly, by locating a variable Faraday rotator between the first polarizer P1 and the birefringent plate BP, and by rotating an azimuth of polarized light incident on the birefringent plate BP, the same condition as that obtained by changing the angle ϕ can be realized, and the transmitted light intensity can therefore be changed according to the rotation of the azimuth.

Referring to FIGS. 7A and 7B, there are shown first and second preferred embodiments of the tunable optical filter according to the present invention respectively. In the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, a variable Faraday rotator FR is provided between the birefringent plate BP and the second polarizer P2. In the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, a variable Faraday rotator FR is provided between the first polarizer P1 and the birefringent plate BP.

The simplest and clearest requirements for carrying out the tunable optical filter according to the present invention in each of the first and second preferred embodiments will now be reconfirmed. In each preferred embodiment, the birefringent plate BP and the variable Faraday rotator FR are provided between the first polarizer

P1 and the second polarizer P2. The first polarizer P1 has a transmission axis P1A determining the polarization axis of transmitted polarized light, and the second polarizer P2 has a transmission axis P2A determining the polarization axis of transmitted polarized light. The birefringent plate BP has optic axes (C1 axis and C2 axis, or any one of them) determining a phase difference given between two orthogonal components of transmitted polarized light. The variable Faraday rotator FR gives a variable Faraday rotation angle to transmitted polarized light. The order of arrangement of the birefringent plate BP and the variable Faraday rotator FR, and the relative positional relation between the optic axis (e.g., C1 axis) and the transmission axes P1A and P2A are set so that the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along the transmittance axis according to a change in the Faraday rotation angle.

Further, the thickness of the birefringent plate BP is designed so that a required FSR can be obtained. To realize wavelength dependence of transmittance, a birefringent plate having a thickness larger than that of a quarter-wave plate or a half-wave plate, specifically, having a thickness sufficiently larger than an operating wavelength, is used as the birefringent plate BP. / More

specifically, a birefringent plate capable of giving a phase difference corresponding to a length 20 to 100 times an operating wavelength is adopted as the birefringent plate BP.

In the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, input light is transmitted through the first polarizer P1, the birefringent plate BP, the variable Faraday rotator FR, and the second polarizer P2 in this order along the optical path OP.

In the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, input light is transmitted through the first polarizer P1, the variable Faraday rotator FR, the birefringent plate BP, and the second polarizer P2 in this order along the optical path OP.

FIG. 8 shows a positional relation among the members in each preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. It is assumed that in the orthogonal three-dimensional coordinate system (X, Y, Z) the Z axis is parallel to the optical path OP, and the Y axis is parallel to the transmission axis P1A of the first polarizer P1. Further, ϕ , θ , and δ will be defined newly or more precisely as follows:

ϕ : angle formed between the C1 axis of the birefringent plate BP and the transmission axis P1A (Y

axis) of the first polarizer P1. It is assumed that the angle ϕ takes a positive sign when rotating clockwise from the Y axis toward the C1 axis.

θ : angle formed between the C1 axis of the birefringent plate BP and the transmission axis P2A of the second polarizer P2. It is assumed that the angle θ takes a positive sign when rotating clockwise from the transmission axis P2A toward the C1 axis.

δ : angle formed between the transmission axis P1A (Y axis) of the first polarizer P1 and the transmission axis P2A of the second polarizer P2. It is assumed that the angle δ takes a positive sign when rotating clockwise from the Y axis toward the transmission axis P2A.

Accordingly, $\phi = \theta + \delta$. Further, the Faraday rotation angle α given by the Faraday rotator FR takes a positive sign when rotating counterclockwise from the X axis toward the Y axis.

In FIG. 8, the group of an ellipse (including a circle) and straight lines represented by reference symbol PS represents wavelength dependence of a polarization state at the output of the birefringent plate BP in the case of $\alpha = 0$.

To make the transmitted light intensity of the tunable optical filter have wavelength dependence, the

condition that " $\sin(2\phi) \sin(2\theta)$ is always zero" must be avoided as apparent from Eq. (1). Therefore, in the case of providing the same condition as that obtained by substantially changing the angle θ by using the Faraday rotator FR as described in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, the angle ϕ must satisfy $\phi \neq n\pi/2$ (n is an integer). Further, in the case of providing the same condition as that obtained by substantially changing the angle ϕ by using the Faraday rotator FR as described in the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, the angle θ must satisfy $\theta \neq n\pi/2$ (n is an integer).

According to the optical theory, a polarization state of light and an operation of an optical element acting on its transmitted light can be represented by a 1×2 matrix known as the Jones Vector and a 2×2 matrix known as the Jones Matrix. Further, optical power at each transmission point can be expressed as the sum of the squares of two components of the Jones Vector. By matrix calculation using the Jones Vector and the Jones Matrix, the transmittance (power transmittance) of the tunable optical filter according to the present invention can be calculated.

FIG. 9 shows the results of calculation of a wavelength characteristic of transmittance in the first

preferred embodiment shown in FIG. 7A under the conditions that the angles ϕ and δ are set to $\phi = \pi/4$ and $\delta = 0$, and the Faraday rotation angle α is changed. In FIG. 9, the vertical axis represents transmittance (dB) and the horizontal axis represents relative wavelength normalized by FSR. As apparent from FIG. 9, the shape of the characteristic curve giving the wavelength characteristic of transmittance changes along the transmittance axis (the vertical axis) with a change in the Faraday rotation angle α in the condition that the points corresponding to relative wavelengths of 0.25 and -0.25 are fixed points.

By changing the Faraday rotation angle α in the range of $-\delta < \alpha < \pi/2 - \delta$ (range of $\pi/2$) in the case of $\phi = \pi/4$, or in the range of $-\delta > \alpha > -\pi/2 - \delta$ (range of $\pi/2$) in the case of $\phi = -\pi/4$, all obtainable conditions of the wavelength characteristic of transmittance can be realized.

According to this relation, it is understood that in the case of $\delta = 0$, that is, in the case that the transmission axes P1A and P2A are made parallel to each other, it is sufficient to select either a positive sign or a negative sign for the Faraday rotation angle α to be changed. Accordingly, by setting $\delta = 0$, $0 < \alpha < \pi/2$ or $0 > \alpha > -\pi/2$ is given, so that a Faraday rotator giving a Faraday rotation angle α in only one direction can be used,

thereby simplifying the configuration of the Faraday rotator FR. This effect is similarly exhibited also in the second preferred embodiment shown in FIG. 7B.

Conversely, by using a variable Faraday rotator capable of giving a Faraday rotation angle α in opposite directions and setting $\delta = \phi$, the transmittance becomes constant irrespective of wavelength when $\alpha = 0$. For example, in the case that the tunable optical filter according to the present invention is incorporated into a system, there is a case that a constant transmittance is preferable irrespective of wavelength when control becomes off to result in $\alpha = 0$. In this case, $-\pi/4 < \alpha < \pi/4$ holds, so that the absolute value of the Faraday rotation angle α is smaller than $\pi/4$. Accordingly, in the case that a variable Faraday rotator applying a magneto-optic effect is used, it is possible to reduce the power consumption when the Faraday rotation angle α is set to a maximum value. Similar discussions apply also to the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, in which it is sufficient to set $\delta = \theta$.

The tunable optical filter having such a characteristic as shown in FIG. 9 is potentially applied to a power equalizer having a variable loss tilt, for example. The term of "loss tilt" indicates a slope of a linear

characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance represented by logarithm as shown in FIG. 10. Such a power equalizer having a variable loss tilt is effective in equalizing gain tilt in an optical amplifier or in compensating for loss tilt in an optical fiber in an optical fiber communication system, for example.

In the case of using the tunable optical filter having such a characteristic as shown in FIG. 9 as an equalizer having a variable loss tilt, an average of losses in an operating wavelength band (which will be hereinafter referred to as "average loss") can be maintained constant by selecting the operating wavelength band in the following manner, for example. That is, a center value between adjacent two wavelengths of some wavelengths providing a maximum loss or a minimum loss is selected as a center wavelength in the operating wavelength band, and the bandwidth of the operating wavelength band is set smaller than $1/2$ of FSR.

FIG. 11 shows an example obtained by selecting a point C which gives a center value between a point A and a point B each providing a maximum loss or a minimum loss in the graph shown in FIG. 9 as a center wavelength in the operating wavelength band, and by setting the bandwidth of the operating wavelength band to $1/5$ of FSR. As apparent

from FIG. 11, a characteristic with a variable loss tilt is obtained. Further, as also apparent from FIG. 11, the average loss does not change irrespective of a change in the Faraday rotation angle α . In the graph shown in FIG. 11, a perfect straight line shown by a broken line clearly indicates that each characteristic curve is substantially linear (as also in the cases of FIGS. 13 and 16).

However, the tunable optical filter having the characteristic of FIG. 11 has a problem that the average loss is as large as 3 dB. To solve this problem, the following two methods are considered.

The first method is a method of making the angle (ϕ or θ) between one of the transmission axes P1A and P2A and the C1 axis of the birefringent plate BP different from $\pm \pi/4$.

For example, in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, the angle ϕ is set so as to satisfy $0 < \phi < \pi/4$ and the Faraday rotation angle α is changed in the range of $-\delta < \alpha < 2\phi - \delta$. Alternatively, the angle ϕ is set so as to satisfy $-\pi/4 < \phi < 0$ and the Faraday rotation angle α is changed in the range of $-\delta > \alpha > 2\phi - \delta$.

FIGS. 12A and 12B show the results of calculation of a wavelength characteristic of transmittance under the conditions that the angles ϕ and δ are set to $\phi = \pi/6$ and δ

= 0 and the Faraday rotation angle α is changed. FIG. 13 shows a wavelength characteristic obtained by enlarging a part of the wavelength characteristic shown in FIGS. 12A and 12B in accordance with the relative wavelength range shown in FIG. 11. As apparent from FIG. 13, the average loss is smaller than that of the wavelength characteristic shown in FIG. 11. However, the average loss changes with a change in the Faraday rotation angle α in the example of FIG. 13.

In the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, the angle θ is set so as to satisfy $0 < \theta < \pi/4$ and the Faraday rotation angle α is changed in the range of $-\delta > \alpha > -2\theta - \delta$. Alternatively, the angle θ is set so as to satisfy $-\pi/4 < \theta < 0$ and the Faraday rotation angle α is changed in the range of $-\delta < \alpha < -2\theta - \delta$. Also in this case, an effect similar to that in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A can be obtained.

Also in the above case of making the angle ϕ or θ different from $\pm\pi/4$ according to the first method, a variable Faraday rotator capable of giving a Faraday rotation angle α in only one direction can be used by setting $\delta = 0$. Further, by setting $\delta = \phi$ in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, or by setting $\delta = \theta$ in the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, the

transmittance can be maintained constant irrespective of wavelength when control becomes off to result in $\alpha = 0$.

The effect obtained by making the angle ϕ or θ different from $\pm\pi/4$ can be realized also by inserting a quarter-wave plate at a proper position with a proper angle to change a polarization orientation as shown in each of FIGS. 14A and 14B.

FIG. 14A shows a third preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In contrast with the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, the third preferred embodiment is characterized in that a quarter-wave plate 2 is additionally provided between the first polarizer P1 and the birefringent plate BP.

FIG. 14B shows a fourth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In contrast with the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, the fourth preferred embodiment is characterized in that a quarter-wave plate 2 is additionally provided between the birefringent plate BP and the second polarizer P2.

The second method is a method of using a partial polarizer as the second polarizer P2. The term of "partial polarizer" refers to a polarizer indicating a transmittance

value not equal to 0 (antilogarithm) upon incidence of linearly polarized light having a polarization plane orthogonal to the transmission axis. In the partial polarizer, the transmittance of linearly polarized light having a polarization plane orthogonal to the transmission axis is defined as t .

FIG. 15 shows the results of calculation of a wavelength characteristic of transmittance by using a partial polarizer having a transmittance $t = 0.25$ (-6dB) as the second polarizer P2 under the conditions that the angles ϕ and δ are set to $\phi = \pi/4$ and $\delta = 0$ and the Faraday rotation angle α is changed.

FIG. 16 shows a wavelength characteristic obtained by enlarging a part of the wavelength characteristic shown in FIG. 15. As compared with the characteristic shown in FIG. 11, the average loss is smaller in the characteristic shown in FIG. 16. Furthermore, the average loss does not change with a change in the Faraday rotation angle α .

In the case of carrying out the second method in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, a variable amount (a variable range of transmittance at a certain wavelength) can be maximized by setting $\phi = \pm \pi/4$, because all obtainable conditions of the wavelength characteristic of transmittance can be realized as previously mentioned.

In the case of carrying out the second method in the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, a variable amount can similarly be maximized by setting $\theta = \pm \pi/4$.

Also in the case of carrying out the second method, a variable Faraday rotator capable of giving a Faraday rotation angle in only one direction can be used by setting $\delta = 0$. Further, by setting $\delta = \phi$ in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, or by setting $\delta = \theta$ in the second preferred embodiment shown in FIG. 7B, the transmittance can be maintained constant irrespective of wavelength when control becomes off to result in $\alpha = 0$.

The first and second methods are effective also in giving a finite value to the maximum loss. For example, in the case of setting $\phi = \pi/4$ in the first preferred embodiment shown in FIG. 7A, the power transmittance takes 0 (antilogarithm) in principle, so that the maximum loss (dB) becomes infinite as apparent from FIG. 9. In some case, such a characteristic is undesirable in operating a system. By using the first or second method, the maximum loss (dB) can be suppressed to a finite value. This will become apparent from FIGS. 12A and 12B and FIG. 15.

FIG. 17 shows a fifth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In each of the previous preferred embodiments, a single

variable Faraday rotator FR is used. In contrast therewith, the fifth preferred embodiment is characterized in that two variable Faraday rotators FR1 and FR2 are provided between the first polarizer P1 and the second polarizer P2. The birefringent plate BP is provided between the Faraday rotators FR1 and FR2. This configuration can provide a wavelength characteristic different from each wavelength characteristic mentioned above.

For example, consider the case of rotating a Faraday rotation angle α_1 given by the Faraday rotator FR1 and a Faraday rotation angle α_2 given by the Faraday rotator FR2 with the relation of $\alpha_1 = \alpha_2$ maintained under the conditions that the angles ϕ and δ are set to $\phi = \pm\pi/4$ and $\delta = n\pi/2$ (n is an integer). Input light is transmitted through the first polarizer P1, the Faraday rotator FR1, the birefringent plate BP, the Faraday rotator FR2, and the second polarizer P2 in this order along the optical path OP.

FIG. 18 shows a wavelength characteristic of transmittance in the case of rotating the Faraday rotation angle α (α_1 and α_2) in the range of $0 < \alpha < \pi/4$ under the conditions that the angle ϕ and δ are set to $\phi = \pi/4$ and $\delta = 0$. In this case, a partial polarizer is used as the

second polarizer P2. As apparent from FIG. 18, the minimum loss in the wavelength characteristic of transmittance is always zero irrespective of the Faraday rotation angle α .

To change each Faraday rotation angle with the relation of $\alpha_1 = \alpha_2$ maintained, the fifth preferred embodiment shown in FIG. 17 employs a control unit 4 connected to the Faraday rotators FR1 and FR2. The control unit 4 controls the Faraday rotators FR1 and FR2 so that the Faraday rotation angle α_1 given by the Faraday rotator FR1 and the Faraday rotation angle α_2 given by the Faraday rotator FR2 become substantially equal to each other.

FIG. 19 shows a sixth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In each of the previous preferred embodiments, a single birefringent plate BP is used. In contrast therewith, the sixth preferred embodiment is characterized in that two birefringent plates BP1 and BP2 are provided between the first polarizer P1 and the second polarizer P2. The variable Faraday rotator FR is provided between the birefringent plates BP1 and BP2. Input light is transmitted through the first polarizer P1, the birefringent plate BP1, the Faraday rotator FR, the birefringent plate BP2, and the second polarizer P2 in this order along the optical path OP.

By using the two birefringent plates BP1 and BP2, a wavelength characteristic like the wavelength characteristic shown in FIG. 18 can be obtained. For example, angles ϕ_1 and ϕ_2 are defined with respect to the optic axes of the birefringent plates BP1 and BP2 respectively, as similarly to the angle ϕ mentioned above, and the angles ϕ_1 and ϕ_2 are set equal to each other ($\phi_1 = \phi_2$). Further, the angles ϕ_1 , ϕ_2 , and δ are set to $\phi_1 = \pm \pi/4$, $\phi_2 = \pm \pi/4$, and $\delta = n\pi/2$ (n is an integer).

FIG. 20 shows a wavelength characteristic of transmittance in the case of rotating the Faraday rotation angle α given by the Faraday rotator FR in the range of $0 < \alpha < \pi/2$ under the conditions that the angles ϕ_1 , ϕ_2 , and δ are set to $\phi_1 = \phi_2 = \pi/4$ and $\delta = 0$. In this case, a partial polarizer is used as the second polarizer P2. As apparent from FIG. 20, the minimum loss in the wavelength characteristic of transmittance is always zero irrespective of the Faraday rotation angle α .

Also in the sixth preferred embodiment shown in FIG. 19, a Faraday rotator capable of giving a variable Faraday rotation angle in only one direction can be used by setting $\delta = 0$.

FIG. 21 shows a seventh preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention.

This preferred embodiment is characterized in that a variable phase shifter 6 is additionally provided between the first polarizer P1 and the second polarizer P2. The variable phase shifter 6 gives a phase difference (retardation) between a polarization component parallel to its optic axis and a polarization component orthogonal to its optic axis. The phase difference is made variable by a control signal supplied to the variable phase shifter 6. The first polarizer P1, the birefringent plate BP, the variable Faraday rotator FR, and the second polarizer P2 are arranged in accordance with the first preferred embodiment shown in FIG. 7A. Further, the variable phase shifter 6 is provided between the first polarizer P1 and the birefringent plate BP.

According to the preferred embodiment shown in FIG. 21, the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes not only with a change in the Faraday rotation angle given by the variable Faraday rotator FR along the transmittance axis, but also with a change in the phase difference given by the variable phase shifter 6 along the wavelength axis. Consequently, not only the characteristic of the tunable optical filter described with reference to FIGS. 3A and 3B, but also the characteristic of the tunable optical filter described with

reference to FIGS. 2A and 2B can be obtained.

To most effectively change the shape of the characteristic curve along the wavelength axis, it is preferable to set the angle between the optic axis of the variable phase shifter 6 and the optic axis of the birefringent plate BP to $n\pi/2$ (n is an integer).

As the variable phase shifter 6, an optical element applying an electro-optic effect such as LiNbO_3 may be adopted. However, such a variable phase shifter applying an electro-optic effect requires a high drive voltage in general.

FIG. 22 shows an eighth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. This preferred embodiment employs a variable phase shifter 6 having a specific configuration to aim at decreasing the drive voltage for the variable phase shifter 6. The variable phase shifter 6 shown in FIG. 22 includes two quarter-wave plates 10 and 12 and another variable Faraday rotator 8 provided between the quarter-wave plates 10 and 12. The angle formed between the optic axis of the quarter-wave plate 10 and the optic axis of the quarter-wave plate 12 is set to $\pi/2$. By setting the angle between the optic axis of each of the quarter-wave plates 10 and 12 and the optic axis of the birefringent plate BP to $n\pi/2$ (n

is an integer), the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance of this tunable optical filter can be changed with a change in the Faraday rotation angle given by the variable Faraday rotator 8 along the wavelength axis.

In the case that the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator 8 is β , the phase difference between two orthogonal components of polarized light given by the variable phase shifter 6 becomes 2β . The principle of this is apparent from the contents disclosed in Japanese Patent Laid-open Publication No. 6-130339 and from the known art, so the description thereof will be omitted herein.

FIG. 23 shows a ninth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In contrast with the eighth preferred embodiment shown in FIG. 22, the ninth preferred embodiment is characterized in that at least one filter unit is additionally provided between the first polarizer P1 and the second polarizer P2. More specifically, N set (N is an integer greater than 1) of filter units 14 (#1 to #N) are provided. Of these filter units 14 (#1 to #N), the i-th (i is an integer satisfying $1 \leq i \leq N$) filter unit 14 (#i) includes a polarizer P1 (#i), a variable phase shifter 6 (#i), a birefringent plate BP (#i), and a Faraday rotator FR (#i)

corresponding to the first polarizer P1, the variable phase shifter 6, the birefringent plate BP, and the variable Faraday rotator FR, respectively.

The wavelength characteristic of transmittance of this tunable optical filter as a whole is given as the sum of the wavelength characteristic of transmittance of the tunable optical filter shown in FIG. 22 and the wavelength characteristic of transmittance of each filter unit 14 (#1 to #N). Accordingly, the wavelength characteristic of transmittance can be easily arbitrarily set.

For example, in the case that three characteristic curves each giving a wavelength characteristic of transmittance are obtained in the tunable optical filter of FIG. 23 as shown in FIG. 24A, the total wavelength characteristic of transmittance is given as the sum of the three characteristic curves, so that a desired wavelength characteristic of transmittance can be obtained as shown in FIG. 24B.

While each filter unit 14 (#i) having the variable phase shifter 6 (#i) for changing a characteristic curve along the wavelength axis and the birefringent plate BP (#i) and the Faraday rotator FR (#i) for changing a characteristic curve along the transmittance axis are utilized in this preferred embodiment, either the variable

phase shifter 6 (#i) or the birefringent plate BP (#i) and the Faraday rotator FR (#i) may be omitted as required.

Some specific embodiments of the Faraday rotator for giving a variable Faraday rotation angle will now be described.

In general, when linearly polarized light, for example, passes through a magneto-optic crystal in the condition where a certain magnetic field is applied to the magneto-optic crystal, i.e., in the condition where the magneto-optic crystal is placed in a certain magnetic field, a polarization direction of the linearly polarized light (defined as a projection of a plane containing an electric field vector of the linearly polarized light onto a plane perpendicular to a propagation direction of the linearly polarized light) is rotated always in a fixed direction irrespective of the propagation direction. This phenomenon is called Faraday rotation, and the magnitude of an angle of rotation of the polarization direction (Faraday rotation angle) depends on a direction and strength of magnetization of the magneto-optic crystal generated by the applied magnetic field. More specifically, the Faraday rotation angle is determined by a size of a component of the strength of magnetization of the magneto-optic crystal in the light propagation direction. Accordingly, by

configuring a Faraday rotator with a magneto-optic crystal and means for applying a magnetic field to the magneto-optic crystal in the same direction as the light propagation direction, it appears that the Faraday rotation angle can be effectively adjusted by adjusting the applied magnetic field.

However, it should be considered herein that when the magnitude of the applied magnetic field is relatively small, the strength of magnetization of the magneto-optic crystal by the applied magnetic field does not reach a saturated condition, but many magnetic domains are present in the magneto-optic crystal. The presence of such many magnetic domains deteriorate reproducibility of the Faraday rotation angle, or makes it difficult to continuously vary the Faraday rotation angle even though good reproducibility is ensured. Furthermore, when many magnetic domains are present in the magneto-optic crystal, there occurs attenuation due to light scattering at an interface between any adjacent magnetic domains, causing a disadvantage in practical use.

In a preferred embodiment of the present invention intended to solve this problem, the variable Faraday rotator includes a magneto-optic crystal located on an optical path, magnetic field applying means for applying

first and second magnetic fields having different directions to the magneto-optic crystal so that the strength of a synthetic magnetic field of the first and second magnetic fields becomes larger than a predetermined value (e.g., a value corresponding to the strength of a magnetic field required to saturate the strength of magnetization of the magneto-optic crystal), and magnetic field adjusting means for changing at least one of the first and second magnetic fields.

The condition where the strength of magnetization of the magneto-optic crystal has been saturated can be understood as a condition where the magnetic domains in the magneto-optic crystal has become a single magnetic domain.

Preferably, the first and second magnetic fields are applied in orthogonal directions in a plane containing a propagation direction of light passing through the magneto-optic crystal.

FIG. 25 shows a variable Faraday rotator 32 applicable to the present invention. The variable Faraday rotator 32 is usable as the variable Faraday rotator FR or the variable Faraday rotator 8. The Faraday rotator 32 includes a magneto-optic crystal 41, a permanent magnet 42 and an electromagnet 43 for applying magnetic fields in orthogonal directions to the magneto-optic crystal 41, and

a variable current source 44 for giving a drive current to the electromagnet 43.

By using a thin slice of YIG (Yttrium-Iron-Garnet) or an epitaxially grown crystal of $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$, as the magneto-optic crystal 41, for example, the drive current can be reduced.

The thickness direction of the magneto-optic crystal 41 is parallel to the Y axis, for example. In this case, the directions of the magnetic fields applied to the magneto-optic crystal 41 by the permanent magnet 42 and the electromagnet 43 are parallel to the Z axis and the X axis respectively. Reference numeral 45 denotes a light beam passing through the magneto-optic crystal 41.

FIG. 26 is a view for illustrating the direction and strength (magnitude) of the magnetic field applied to the magneto-optic crystal 41, and of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 in the Faraday rotator 32 shown in FIG. 25.

In the case that a magnetic field vector 51 is applied to the magneto-optic crystal 41 by the permanent magnet 42 only, a magnetization vector in the magneto-optic crystal 41 is parallel to the Z axis as shown by reference numeral 52. In this case, the strength of the applied magnetic field (the length of the magnetic field vector 51)

is set so that the strength of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 (the length of the magnetization vector 52) is saturated. It is assumed that a required maximum Faraday rotation angle is obtained in this condition.

When a magnetic field vector 53 is applied parallel to the X axis by the electromagnet 43, the synthetic magnetic field is given as a synthetic vector of the magnetic field vectors 51 and 53 as shown by reference numeral 54. This synthetic magnetic field 54 generates a magnetization vector 55 in the magneto-optic crystal 41. The magnetization vector 55 and the magnetic field vector 54 are parallel to each other, and the length of the magnetization vector 55 is equal to the length of the magnetization vector 52.

Although the strength of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 is fixed, a degree of contribution of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 to the Faraday rotation angle is not always the same, because the Faraday rotation angle depends also upon the relation between the direction of the magnetization and the light propagation direction. That is, in comparing to the condition of the magnetization vector 52 with the condition of the magnetization vector 55, a Z component 56 of the

magnetization vector 55 is smaller than a Z component (the magnetization vector 52 itself) of the magnetization vector 52. Incidentally, the Faraday rotation angle corresponding to the magnetization vector 55 is smaller than that corresponding to the magnetization vector 52.

According to this preferred embodiment, the strength of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 is always saturated over the whole variable range of the Faraday rotation angle, thereby eliminating the disadvantage caused by formation of many magnetic domains in the magneto-optic crystal 41. That is, reproducibility of the Faraday rotation angle can be improved, and the Faraday rotation angle can be continuously changed. Further, by adjusting the drive current supplied from the variable current source 44, the Faraday rotation angle can be changed continuously with good reproducibility. Accordingly, by applying the Faraday rotator 32 to the present invention, it is possible to provide a tunable optical filter which can be operated at high speeds and has high reliability.

Accordingly, by applying such a variable Faraday rotator to the present invention, it is possible to provide a tunable optical filter whose wavelength characteristic of transmittance is well reproducible and continuously

variable.

FIG. 27 shows another Faraday rotator 32' applicable to the present invention. The Faraday rotator 32' is different from the Faraday rotator 32 shown in FIG. 25 in the point that parallel plane surfaces 61 and 62 are formed at opposite edges of a rectangular magneto-optic crystal 41 and that a light beam 63 is passed through the plane surfaces 61 and 62. Accordingly, both the direction of a magnetic field by the permanent magnet 42 and the direction of a magnetic field by the electromagnet 43 are inclined about 45° to a light propagation direction (parallel to the Z axis).

FIG. 28 is a view for illustrating the direction and strength of the magnetic field applied to the magneto-optic crystal 41 and of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 in the Faraday rotator 32' shown in FIG. 27. The magnetic field applied by the electromagnet 43 is adjustable in strength and direction in the range between a condition shown by reference numeral 71 and a condition shown by reference numeral 72. Reference numeral 73 denotes a magnetic field applied by the permanent magnet 42. In this case, the synthetic magnetic field changes in strength and direction in the range between a condition shown by reference numeral 74 and a condition shown by

reference numeral 75. In association therewith, the magnetization of the magneto-optic crystal 41 changes in strength and direction in the range between a condition shown by reference numeral 76 and a condition shown by reference numeral 77. By using the Faraday rotator 32', the variable range of the Faraday rotation angle can be increased without much increasing the variable range for the drive current of the electromagnet 43.

The applied magnetic field by the permanent magnet 42 is set so that the strength of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 is sufficiently saturated in a condition shown by reference numeral 78 where the strength of the magnetization is minimized (the applied magnetic field by the electromagnet 43 is zero).

FIG. 29 shows still another variable Faraday rotator 32" applicable to the present invention. The Faraday rotator 32" is different from the Faraday rotator 32 shown in FIG. 25 in the point that an electromagnet 81 is provided in place of the permanent magnet 42 shown in FIG. 25 and that a variable current source 82 is additionally provided to apply a drive current to the electromagnet 81.

FIG. 30 is a view for illustrating the direction and strength of the magnetic field applied to the magneto-

optic crystal 41 and of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 in the Faraday rotator 32" shown in FIG.

29. According to the preferred embodiment shown in FIG.

29, the synthetic magnetic field can be changed

continuously as maintaining saturation magnetization as

shown by reference numerals 91 to 94 by adjusting the

applied magnetic fields by the electromagnets 43 and 81.

In association therewith, the magnetization of the magneto-optic crystal 41 changes continuously as shown by reference numerals 95 to 98. According to the preferred embodiment shown in FIG. 30, the variable range of the Faraday rotation angle can be easily increased without using a complex-shaped magneto-optic crystal as shown in FIG. 27.

In the case of using the Faraday rotator 32", the sense of a Z component of the magnetization of the magneto-optic crystal 41 can be changed by changing the polarity of the variable current source 44 or 82. Accordingly, the direction of Faraday rotation can be changed as required. For example, the Faraday rotation angle can be changed in the range of $\pm 45n^\circ$ (n is a positive integer) with respect to 0° . Accordingly, by applying the Faraday rotator 32" to the present invention and setting the angle δ to $\delta = \phi$ or $\delta = \theta$ as mentioned previously, for example, the transmittance can be maintained constant irrespective of

wavelength when the Faraday rotation angle is 0° . For example, when the Faraday rotator 32" is incorporated into a system and control becomes off to shut off the variable current sources 44 and 82, the Faraday rotation angle becomes 0° . Accordingly, the transmittance becomes constant irrespective of wavelength, thereby facilitating restart of the system.

FIG. 31 shows a tenth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In this preferred embodiment, wedge plates 121 and 122 each formed of a birefringent material are used as the first polarizer P1 and the second polarizer P2 respectively. In association therewith, this preferred embodiment further includes an optical fiber 123, a lens 124 for changing a beam parameter of light emerging from the optical fiber 123 (e.g., collimating the emerging light) to supply the light beam to the wedge plate 121, a lens 125 for converging a light beam from the wedge plate 122, and an optical fiber 126 to which the light beam converged by the lens 125 is coupled under given conditions.

The wedge plates 121 and 122 are arranged so that a top portion and a bottom portion of the wedge plate 121 are opposed to a bottom portion and a top portion of the wedge plate 122 respectively, and corresponding surfaces of the

wedge plates 121 and 122 are parallel to each other. That is, the wedge plates 121 and 122 have the same shape.

For example, the optic axis of the wedge plate 121 is parallel to the Y axis, and the optic axis of the wedge plate 122 is parallel to the Y axis.

The transmittance axis of each of the wedge plates 121 and 122 as polarizers is defined as a polarization direction of an extraordinary ray whose polarization plane is parallel to the optic axis, or a polarization direction of an ordinary ray whose polarization plane is perpendicular to the optic axis.

Light emerging from an excitation end of the optical fiber 123 is collimated by the lens 124 to become a parallel light beam. This beam is denoted by reference numeral 130 with its beam thickness neglected. The beam 130 is separated into a beam 131 corresponding to the ordinary ray and a beam 132 corresponding to the extraordinary ray in the wedge plate 121.

The beams 131 and 132 are transmitted through the birefringent plate BP and the variable Faraday rotator FR in this order to become beams 133 and 134 respectively. The polarization states of the beams 133 and 134 are determined by the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator FR.

The beam 133 is separated into beams 135 and 136 respectively, corresponding to the ordinary ray and the extraordinary ray in the wedge plate 122. The beam 134 is separated into beams 137 and 138 respectively, corresponding to the extraordinary ray and the ordinary ray in the wedge plate 122.

In considering the history of refractions in the past of the beams 135 to 138 and the shape and arrangement of the wedge plates 121 and 122, the beams 135 and 137 are parallel to each other and the beams 136 and 138 are not parallel to each other. Accordingly, only the beams 135 and 137 can be focused through the lens 125 to be coupled to an excitation end of the optical fiber 126.

The ratio of the total power of the beams 135 and 137 and the total power of the beams 136 and 138 depends on the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator FR. For example, in the case that the beams 133 and 134 are linearly polarized light having the same polarization planes as those of the beams 131 and 132 respectively, the beams 133 and 134 are entirely converted into the beams 135 and 137 respectively. In the case that the beams 133 and 134 are linearly polarized light having polarization planes orthogonal to the polarization planes of the beams 131 and 132 respectively, the beams 133 and 134 are entirely

converted into the beams 136 and 138 respectively.

When the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator FR is constant, the total power of the beams 135 and 137 is not dependent upon the polarization state of the beam 130. As apparent from the previous description, the total power of the beams 135 and 137 depends on their wavelengths.

According to this preferred embodiment, the transmittance of the tunable optical filter can therefore be made independent of the polarization state of input light. That is, it is possible to provide a polarization-independent tunable optical filter.

FIG. 32 shows an eleventh preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In this preferred embodiment, a wedge plate 141 formed of a birefringent material is used as the first polarizer P1, and two wedge plates 142 and 143 each formed of a birefringent material are used as the second polarizer P2. A top portion and a bottom portion of the wedge plate 141 are opposed to a bottom portion and a top portion of the wedge plate 142 respectively. A top portion and a bottom portion of the wedge plate 143 are opposed to the bottom portion and the top portion of the wedge plate 142 respectively.

By letting θ_1 , θ_2 , and θ_3 denote the wedge angles of the wedge plates 141, 142, and 143; d_1 denote the distance between the wedge plates 141 and 142, and d_2 denote the distance between the wedge plates 142 and 143, each wedge plate is formed and arranged in order to satisfy the following two equation.

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_3, \quad d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_3$$

The optic axis of the wedge plate 141 is parallel to the Y axis, and the optic axes of the wedge plates 142 and 143 are parallel to each other. The optic axes of the wedge plates 142 and 143 are parallel to the Y axis, for example.

In the preferred embodiment shown in FIG. 31, the distance between the wedge plates 121 and 122 is necessarily relatively large, because the birefringent plate BP and the Faraday rotator FR are provided between the wedge plates 121 and 122. Accordingly, the distance between the beams 135 and 137 becomes relatively large, so that the beams 135 and 137 are readily affected by the aberration of the lens 125 such as spherical aberration.

According to the preferred embodiment shown in FIG. 32, a beam from the lens 124 is separated by the wedge plate 141 and next being combined by the wedge plates 142 and 143. At this time, the optical paths of an ordinary

ray component and an extraordinary ray component output from the wedge plate 143 are made substantially coincident with each other. Consequently, these components can be efficiently input into the optical fiber 126 by the lens 125 with almost no influence of its aberration.

FIG. 33 shows a twelfth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. In this preferred embodiment, two parallel-plane plates 151 and 152 each formed of a birefringent material are used as the first polarizer P1 and the second polarizer P2 respectively. The parallel-plane plates 151 and 152 have the same thickness. The optic axes of the parallel-plane plates 151 and 152 are set so that they are orthogonal to each other and each optic axis is inclined 45° to the Z axis.

The transmission axis of each of the parallel-plane plates 151 and 152 as polarizers is defined as a polarization direction of an extraordinary ray whose polarization plane is parallel to the optic axis or a polarization direction of an ordinary ray whose polarization plane is perpendicular to the optic axis.

Light emerging from the excitation end of the optical fiber 123 is changed in its beam parameter by the lens 124 to become a converging beam 160, for example. The

beam 160 is separated into beams 161 and 162 respectively, corresponding to the ordinary ray and the extraordinary ray in the parallel-plane plate 151. The beams 161 and 162 are parallel to each other. The beams 161 and 162 are transmitted through the birefringent plate BP and the Faraday rotator FR in this order to become beams 163 and 164 respectively. The polarization states of the beams 163 and 164 are determined according to the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator FR. The beam 163 is separated into beams 165 and 166 respectively, corresponding to the ordinary ray and the extraordinary ray in the parallel-plane plate 152. The beam 164 is separated into beams 167 and 168 respectively, corresponding to the ordinary ray and the extraordinary ray in the parallel-plane plate 152.

The beam 165 comes into coincidence with the beam 168 because the parallel-plane plates 151 and 152 are parallel to each other and have the same thickness along the Z axis. Accordingly, only the beams 165 and 168 can be converged by the lens 125 to enter the optical fiber 126. The ratio between the total power of the beams 165 and 168 and the total power of the beams 166 and 167 depends on the Faraday rotation angle given by the Faraday rotator FR.

When the Faraday rotation angle given by the

Faraday rotator FR is constant, the total power of the beams 165 and 168 is not dependent upon the polarization state of the beam 160. As apparent from the previous description, the total power of the beams 165 and 168 depends on their wavelengths.

Also according to this preferred embodiment, it is possible to provide a polarization-independent tunable optical filter.

In the case of using a parallel-plane plate formed of a birefringent material as each polarizer, various arrangements may be adopted by additionally providing a half-wave plate.

FIGS. 34A and 34B illustrate a thirteenth preferred embodiment of the tunable optical filter according to the present invention. FIG. 34A corresponds to the tenth preferred embodiment shown in FIG. 31, and FIG. 34B shows the thirteenth preferred embodiment.

In the configuration shown in FIG. 34A, each of the wedge plates 121 and 122 has a polarization separation angle or wedge angle θ' . The beams 135 and 137 are coupled to the optical fiber 126 by the lens 125, but the beams 136 and 138 are not coupled to the optical fiber 126.

In the thirteenth preferred embodiment shown in FIG. 34B, wedge plates 121' and 122' each having a wedge

angle θ'' smaller than the wedge angle θ' are used. Beams 135' to 138' are output from the wedge plate 122'. The beams 135' and 137' are entirely coupled to the optical fiber 126 by the lens 125 in principle. Because the wedge angle θ'' is smaller than the wedge angle θ' , the beams 136' and 138' originally unexpected to be coupled to the optical fiber 126 may be partially coupled to the optical fiber 126. If such partial coupling of the beams 136' and 138' occurs, it is possible to obtain an effect similar to that obtained by using a partial polarizer as the second polarizer P2.

The condition for partially coupling the beams 136' and 138' to the optical fiber 126 is given by $a > f \sin \theta''$ where a is the core diameter of the optical fiber 126 and f is the focal length of the lens 125. By satisfying this condition, the average loss of the tunable optical filter can be reduced as in the case of using a partial polarizer as the second polarizer P2.

Having thus described various preferred embodiments of the present invention, two or more of the above preferred embodiments may be combined to carry out the present invention.

As described above, according to the present invention, it is possible to provide a tunable optical

filter in which the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along the transmittance axis. The other effects by the present invention become apparent from the above description.

The present invention is not limited to the details of the above described preferred embodiments. The scope of the invention is defined by the appended claims and all changes and modifications as fall within the equivalence of the scope of the claims are therefore to be embraced by the invention.

WHAT IS CLAIMED IS:

1. A tunable optical filter comprising:
first and second polarizers each having a transmission axis determining a polarization axis of transmitted polarized light;

a birefringent element provided between said first and second polarizers and having an optic axis determining a phase difference given between two orthogonal components of transmitted polarized light; and

a Faraday rotator provided between said first and second polarizers for giving a variable Faraday rotation angle to transmitted polarized light.

2. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

the order of arrangement of said birefringent element and said Faraday rotator and the relative positional relation between said optic axis of said birefringent element and said transmission axis of each of said first and second polarizers being set so that the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a transmittance axis according to a change in said Faraday rotation angle.

3. A tunable optical filter according to Claim 2, wherein:

input light is supplied to said first polarizer;
said input light having a predetermined band;
said predetermined band being narrower than $1/2$ of
a spectral width giving a period of said characteristic curve.

4. A tunable optical filter according to Claim 1,
wherein:

input light is supplied to said first polarizer;
and
said second polarizer includes a partial polarizer.

5. A tunable optical filter according to Claim 1,
wherein:

said Faraday rotator is provided between said
birefringent element and said second polarizer;

input light is transmitted through said first
polarizer, said birefringent element, said Faraday rotator,
and said second polarizer in this order; and

an angle ϕ formed between the transmission axis of
said first polarizer and the optic axis of said
birefringent element satisfies $\phi \neq n\pi/2$ (n is an integer).

6. A tunable optical filter according to Claim 5,
wherein said angle ϕ is equal to $\pi/4$.

7. A tunable optical filter according to Claim 6,
wherein the transmission axes of said first and second
polarizers are parallel to each other.

8. A tunable optical filter according to Claim 6, wherein the transmission axis of said second polarizer is parallel to the optic axis of said birefringent element.

9. A tunable optical filter according to Claim 5, wherein said angle ϕ is different from $\pi/4$.

10. A tunable optical filter according to Claim 5, further comprising a quarter-wave plate provided between said first polarizer and said birefringent element.

11. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

said Faraday rotator is provided between said first polarizer and said birefringent element;

input light is transmitted through said first polarizer, said Faraday rotator, said birefringent element, and said second polarizer in this order; and

an angle θ formed between the optic axis of said birefringent element and the transmission axis of said second polarizer satisfies $\theta \neq n\pi/2$ (n is an integer).

12. A tunable optical filter according to Claim 11, wherein said θ is equal to $\pi/4$.

13. A tunable optical filter according to Claim 12, wherein the transmission axes of said first and second polarizers are parallel to each other.

14. A tunable optical filter according to Claim

12, wherein the transmission axis of said second polarizer is parallel to the optic axis of said birefringent element.

15. A tunable optical filter according to Claim 11, wherein said angle θ is different from $\pi/4$.

16. A tunable optical filter according to Claim 11, further comprising a quarter-wave plate provided between said birefringent element and said second polarizer.

17. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

said Faraday rotator includes first and second Faraday rotators;

said birefringent element is provided between said first and second Faraday rotators; and

input light is transmitted through said first polarizer, said first Faraday rotator, said birefringent element, said second Faraday rotator, and said second polarizer in this order.

18. A tunable optical filter according to Claim 17, further comprising means for controlling said first and second Faraday rotators so that a Faraday rotation angle by said first Faraday rotator becomes substantially equal to a Faraday rotation angle by said second Faraday rotator.

19. A tunable optical filter according to Claim 1,

wherein:

said birefringent element includes first and second birefringent elements;

said Faraday rotator is provided between said first and second birefringent elements; and

input light is transmitted through said first polarizer, said first birefringent element, said Faraday rotator, said second birefringent element, and said second polarizer in this order.

20. A tunable optical filter according to Claim 19, wherein said first and second birefringent elements have optic axes parallel to each other.

21. A tunable optical filter according to Claim 1, further comprising a variable phase shifter provided between said first and second polarizers;

wherein input light is supplied to said first polarizer.

22. A tunable optical filter according to Claim 21, wherein said variable phase shifter includes first and second quarter-wave plates and another Faraday rotator provided between said first and second quarter-wave plates for giving a variable Faraday rotation angle.

23. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein said Faraday rotator includes a magneto-optic

crystal located on an optical path, magnetic field applying means for applying first and second magnetic fields having different directions to said magneto-optic crystal so that the strength of a synthetic magnetic field of said first and second magnetic fields becomes larger than a predetermined value, and magnetic field adjusting means for changing the strength of at least one of said first and second magnetic fields.

24. A tunable optical filter according to Claim 23, wherein said first and second magnetic fields are applied in orthogonal directions in a plane containing a propagation direction of light passing through said magneto-optic crystal.

25. A tunable optical filter according to Claim 23, wherein:

said magnetic field applying means includes an electromagnet and a permanent magnet for applying said first and second magnetic fields respectively; and

said magnetic field adjusting means adjusts a drive current of said electromagnet.

26. A tunable optical filter according to Claim 23, wherein:

said magnetic field applying means includes first and second electromagnets for applying said first and

second magnetic fields respectively; and

said magnetic field adjusting means adjusts a drive current of at least one of said first and second electromagnets.

27. A tunable optical filter according to Claim 23, wherein said predetermined value is a value corresponding to a magnetic field strength required to saturate magnetization of said magneto-optic crystal.

28. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

said first and second polarizers comprise first and second wedge plates each formed of a birefringent material, respectively;

said first and second wedge plates being arranged so that a top portion and a bottom portion of said first wedge plate are opposed to a bottom portion and a top portion of said second wedge plate respectively, and that corresponding surfaces of said first and second wedge plates are parallel to each other;

said tunable optical filter further comprising:

a first optical fiber;

a first lens for supplying light from said first optical fiber to said first wedge plate;

a second lens for converging a light beam from said

second wedge plate; and

a second optical fiber to which said light beam converged by said second lens is coupled under given conditions.

29. A tunable optical filter according to Claim 28, wherein a condition of $f \sin \theta < a$ is satisfied where θ is the polarization separation angle of each of said first and second wedge plates, a is the core diameter of said second optical fiber, and f is the focal length of said second lens.

30. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

said first polarizer includes a first wedge plate formed of a birefringent material; and

said second polarizer includes second and third wedge plates each formed of a birefringent material;

said first, second, and third wedge plates being arranged so that a top portion and a bottom portion of said first wedge plate are opposed to a bottom portion and a top portion of said second wedge plate respectively, and the top portion and the bottom portion of said second wedge plate are opposed to a bottom portion and a top portion of said third wedge plate respectively;

said tunable optical filter further comprising:

a first optical fiber;
a first lens for supplying light from said first optical fiber to said first wedge plate;
a second lens for converging a light beam from said third wedge plate; and
a second optical fiber to which said light beam converged by said second lens is coupled under given conditions.

31. A tunable optical filter according to Claim 1, wherein:

said first and second polarizers comprise first and second parallel-plane plates each formed of a birefringent material respectively;

said tunable optical filter further comprising:
a first optical fiber;
a first lens for supplying light from said first optical fiber to said first parallel-plane plate;
a second lens for converging a light beam from said second parallel-plane plate; and
a second optical fiber to which said light beam converged by said second lens is coupled under given conditions.

Allowed
32. A tunable optical filter according to Claim 1, further comprising at least one filter unit provided

between said first and second polarizers;

said filter unit comprising elements respectively corresponding to said first polarizer, said birefringent element, and said Faraday rotator.

33. A tunable optical filter according to Claim 32, further comprising a variable phase shifter provided between said first and second polarizers;

said filter unit further comprising an element corresponding to said variable phase shifter.

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

The present invention relates to a tunable optical filter having a variable wavelength characteristic of transmittance. The tunable optical filter includes first and second polarizers each having a transmission axis determining a polarization axis of transmitted polarized light, a birefringent element having an optic axis determining a phase difference given between two orthogonal components of transmitted polarized light, and a Faraday rotator for giving a variable Faraday rotation angle to transmitted polarized light. The birefringent element and the Faraday rotator are provided between the first and second polarizers. The order of arrangement of the birefringent element and the Faraday rotator, and the relative positional relation between the optic axis of the birefringent element and the transmission axis of each polarizer are set so that the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a transmittance axis according to a change in the Faraday rotation angle.

FIG. 1

PRIOR ART

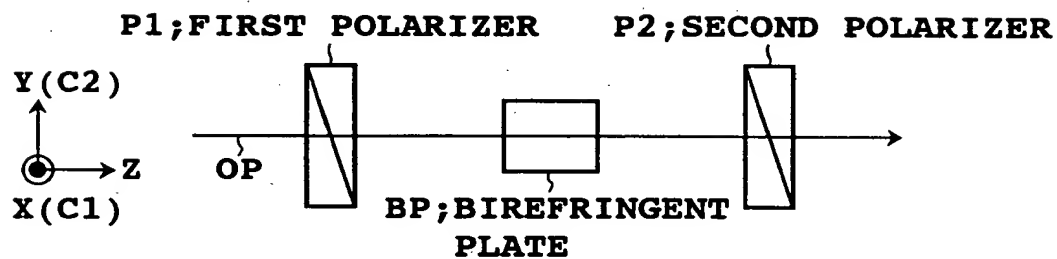


FIG. 2A
PRIOR ART

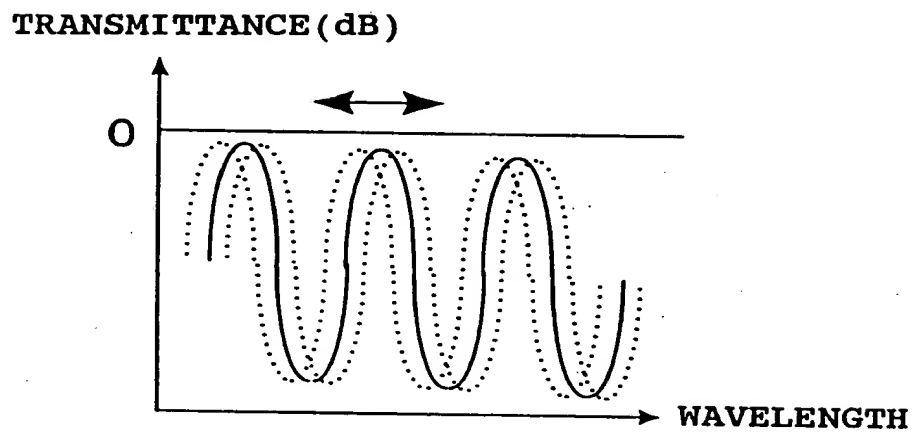


FIG. 2B
PRIOR ART

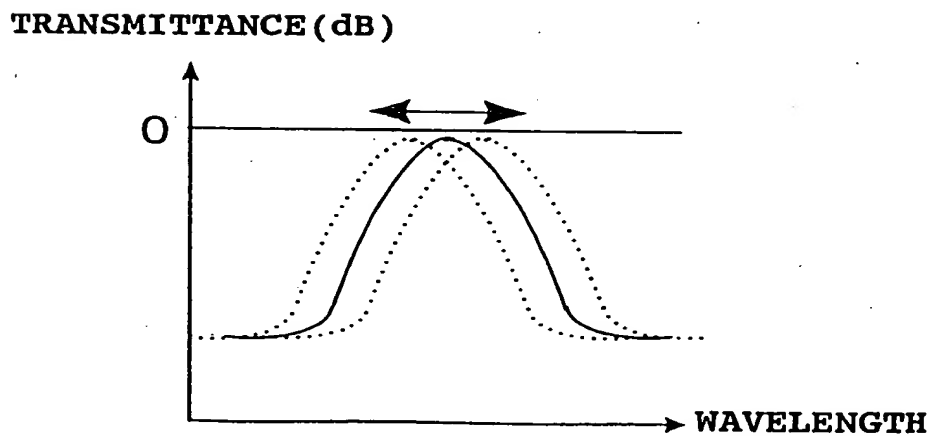


FIG. 3 A

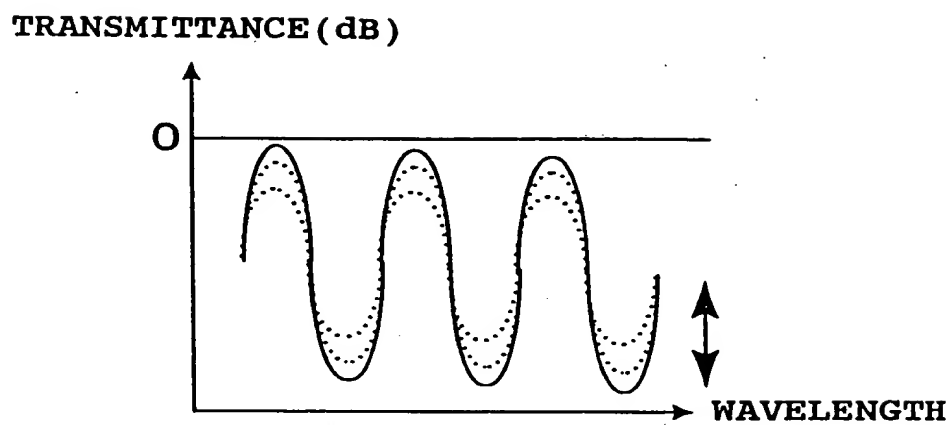


FIG. 3 B

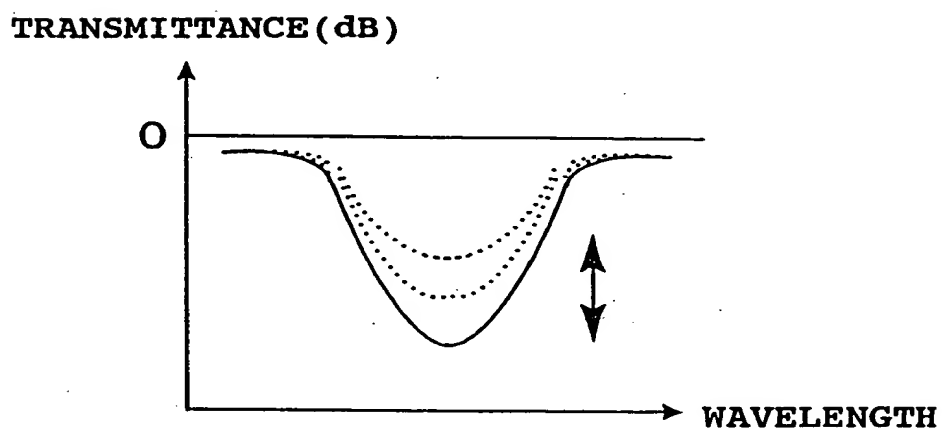
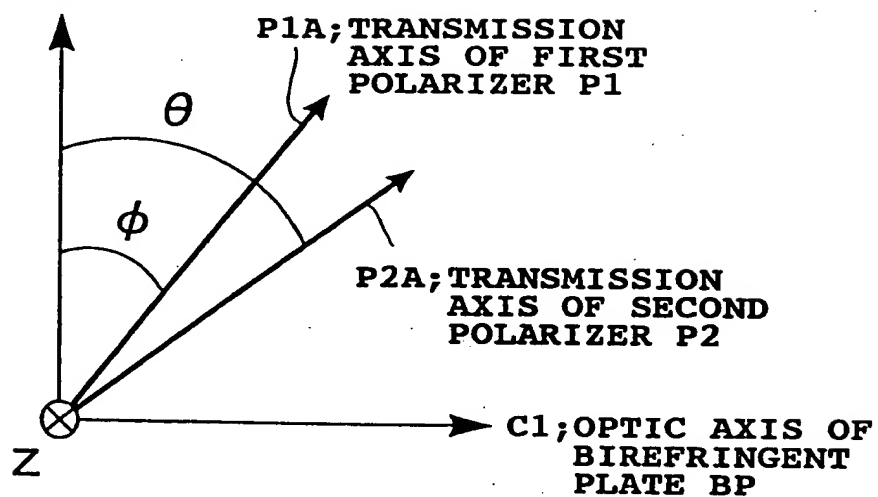


FIG. 4

C2; OPTIC AXIS OF
BIREFRINGENT
PLATE BP



F I G . 5

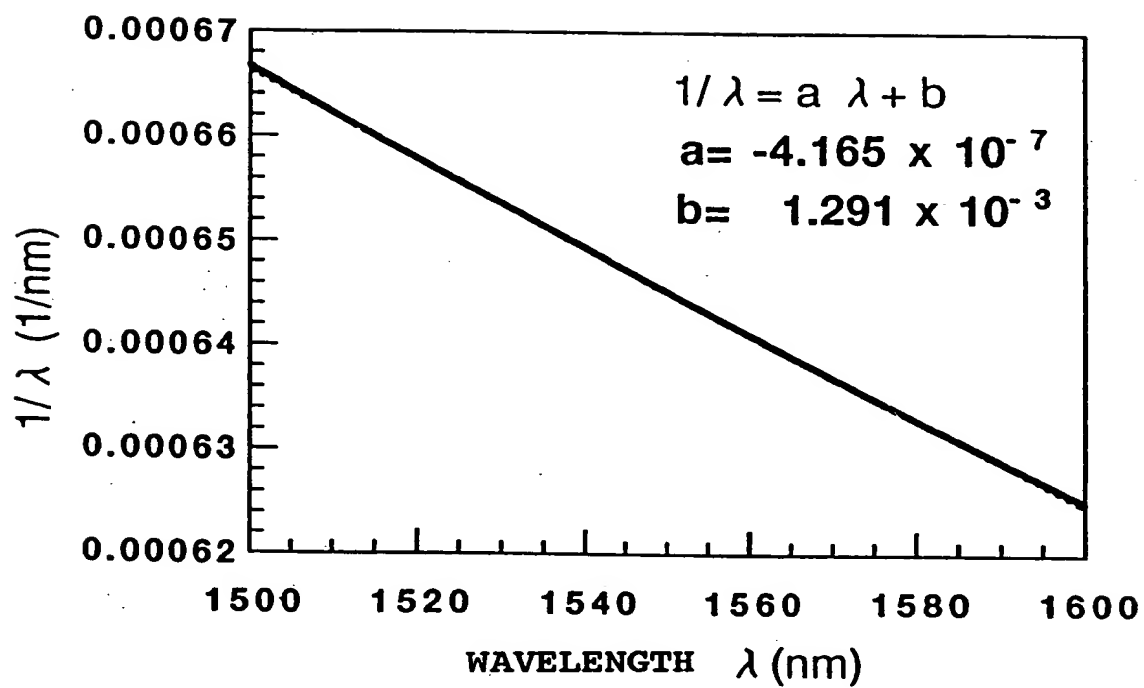


FIG. 6

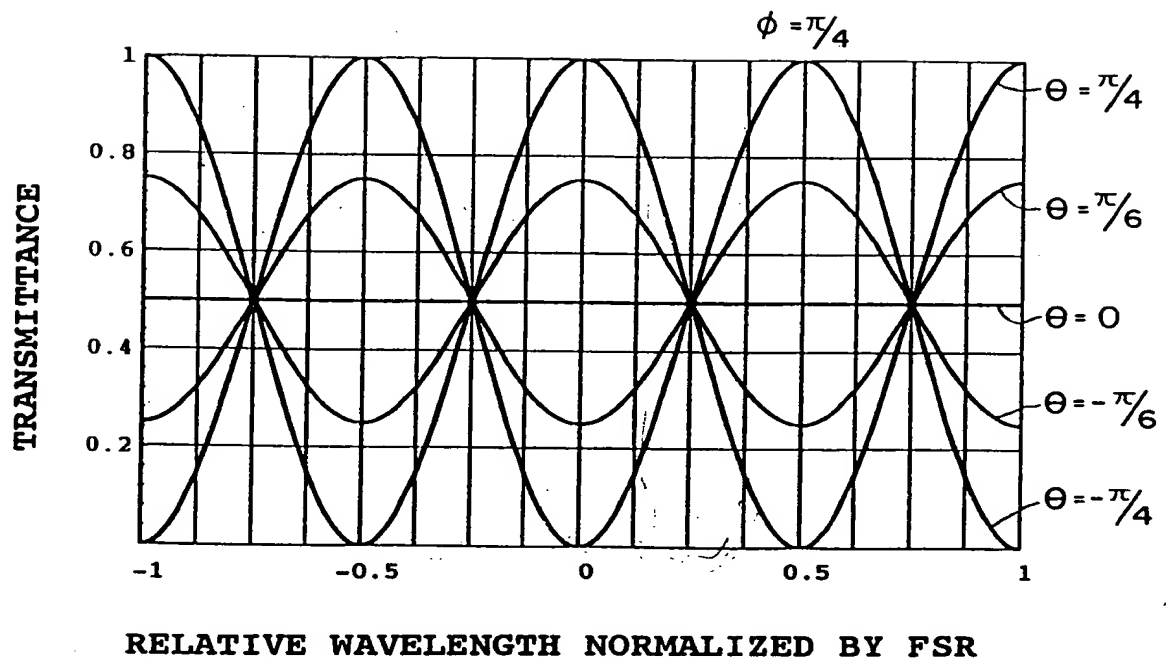


FIG. 7 A

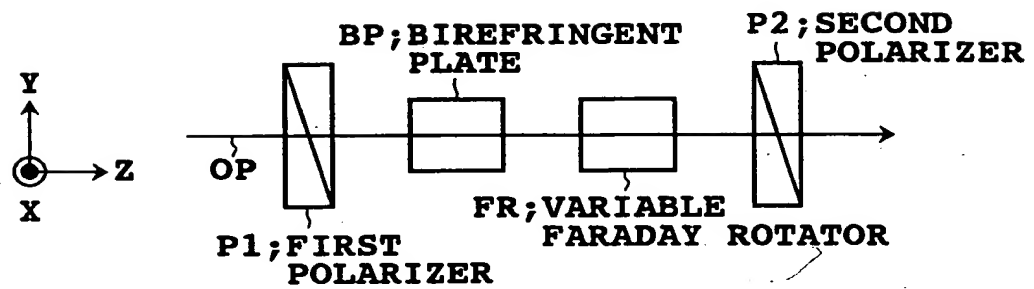


FIG. 7 B

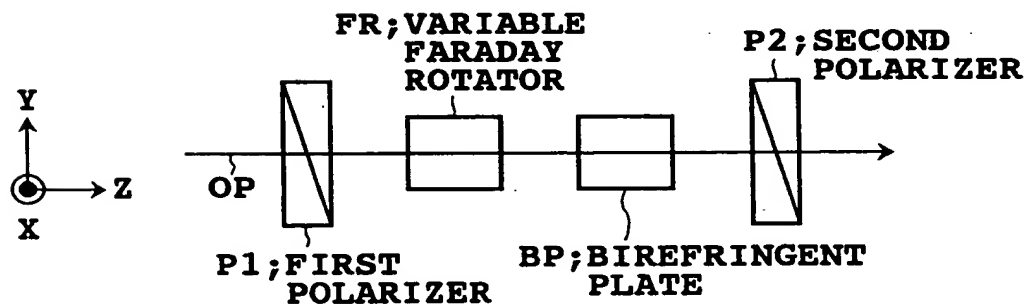


FIG. 8

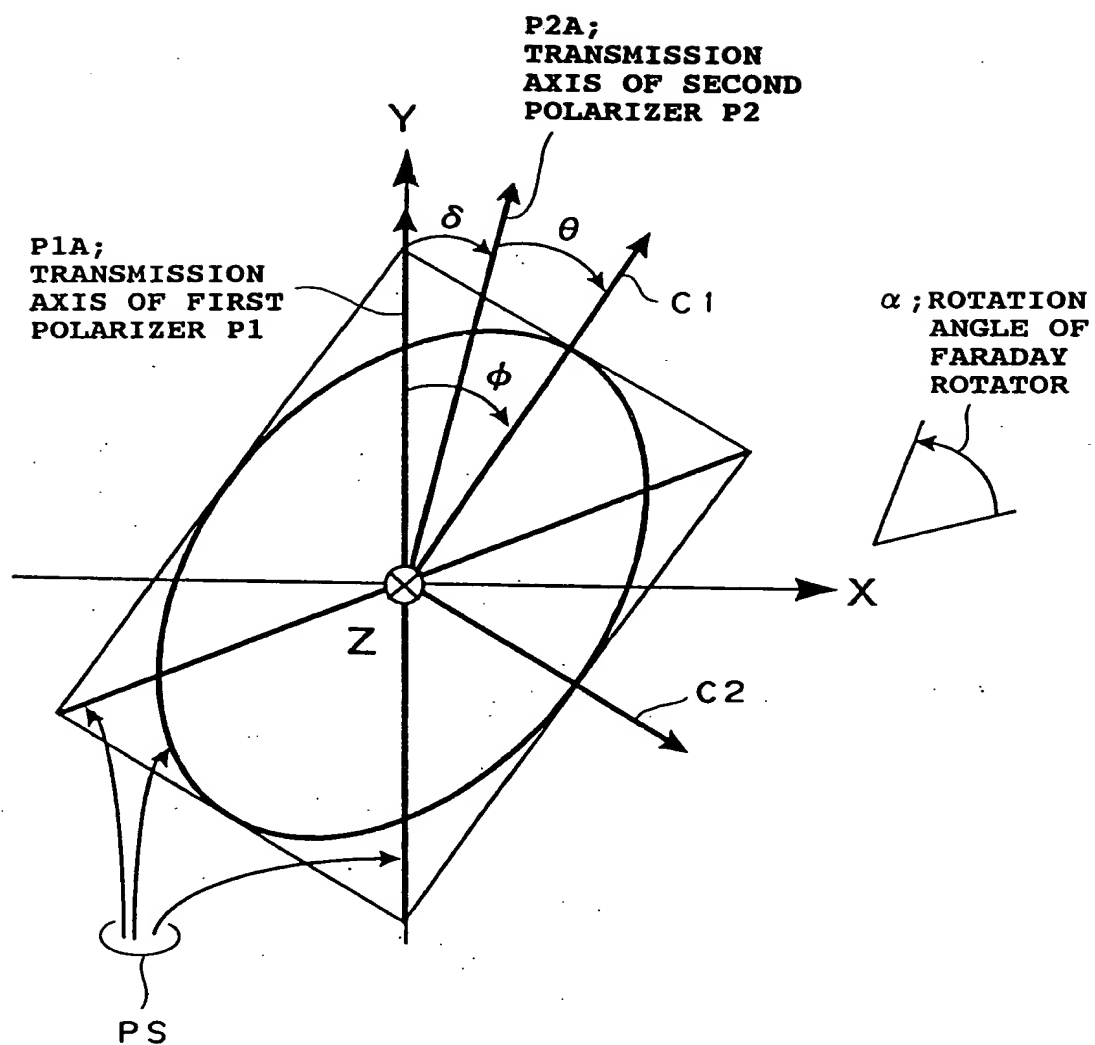


FIG. 9

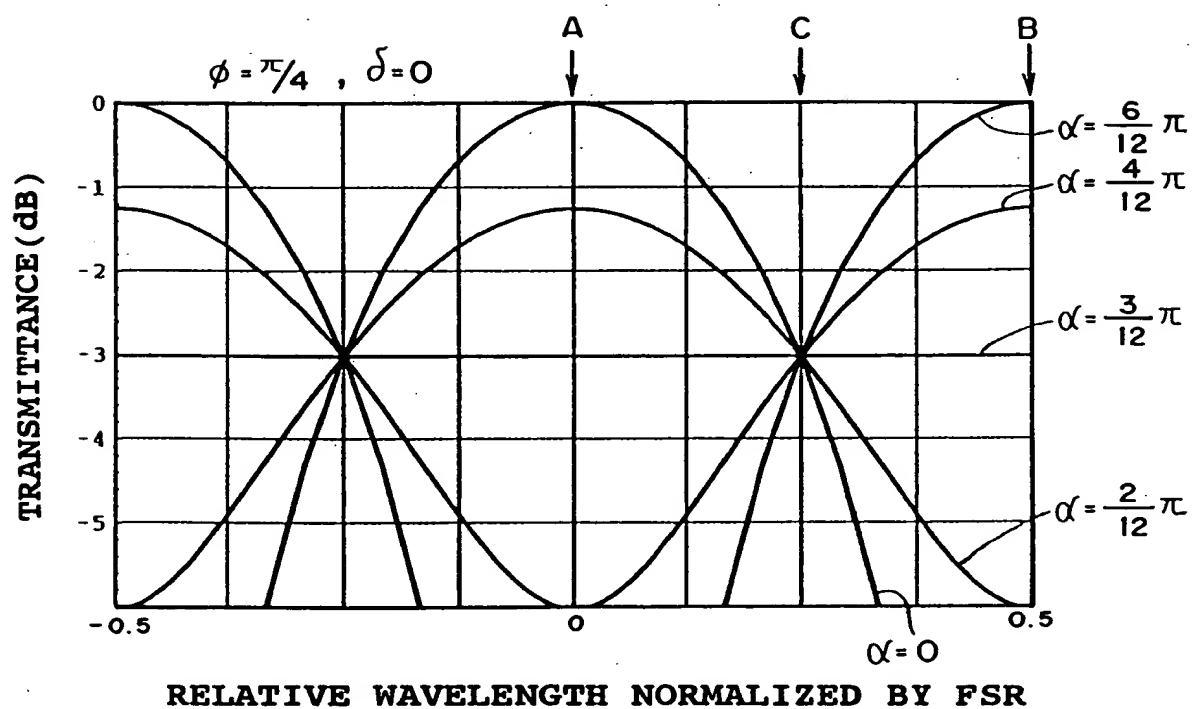


FIG. 10

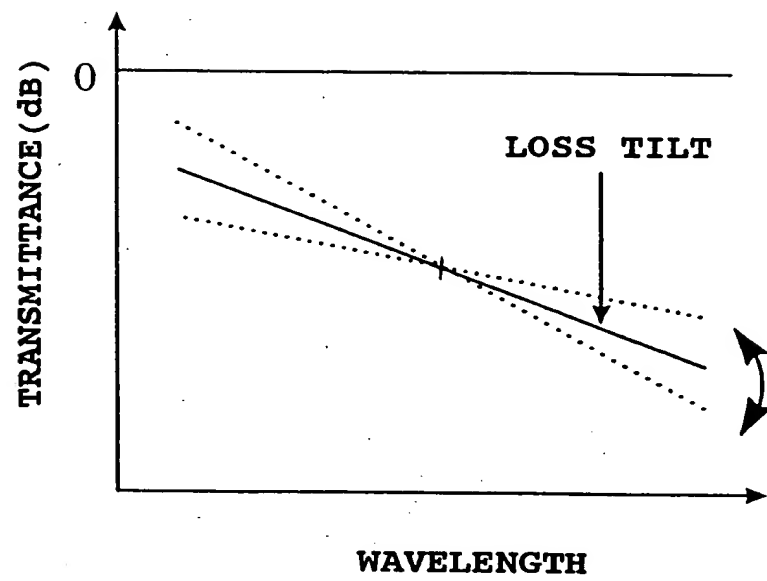
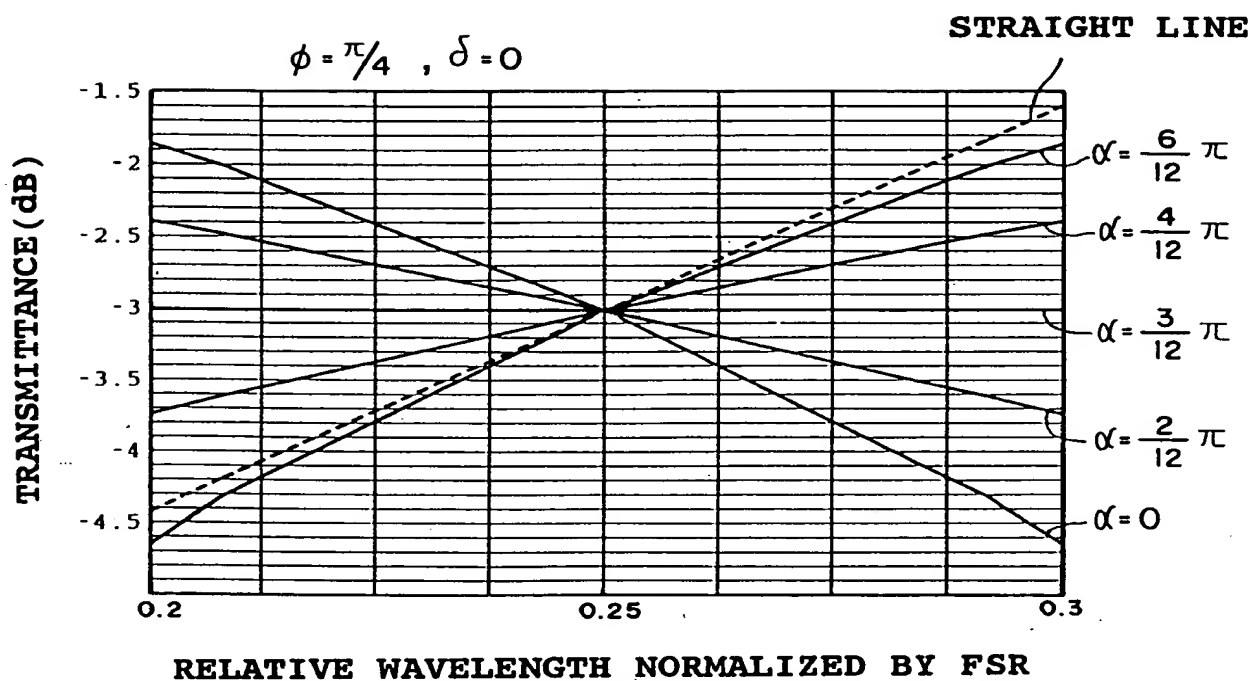


FIG. 11



1.53 ~ 1.56

FIG. 12A

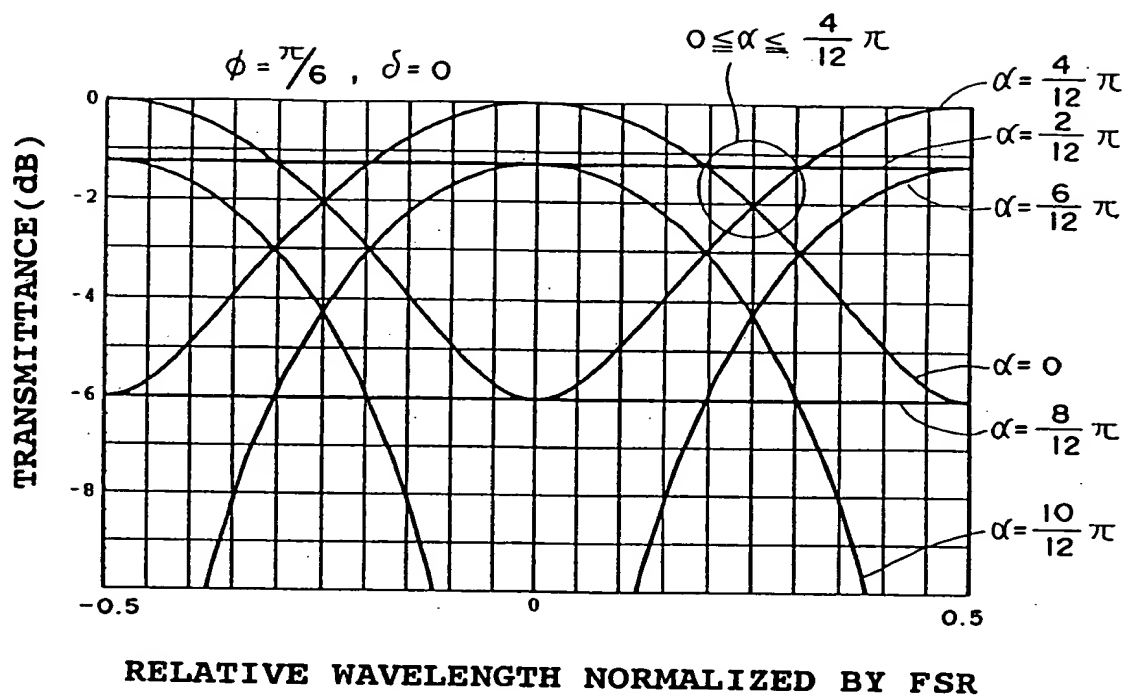


FIG. 12B

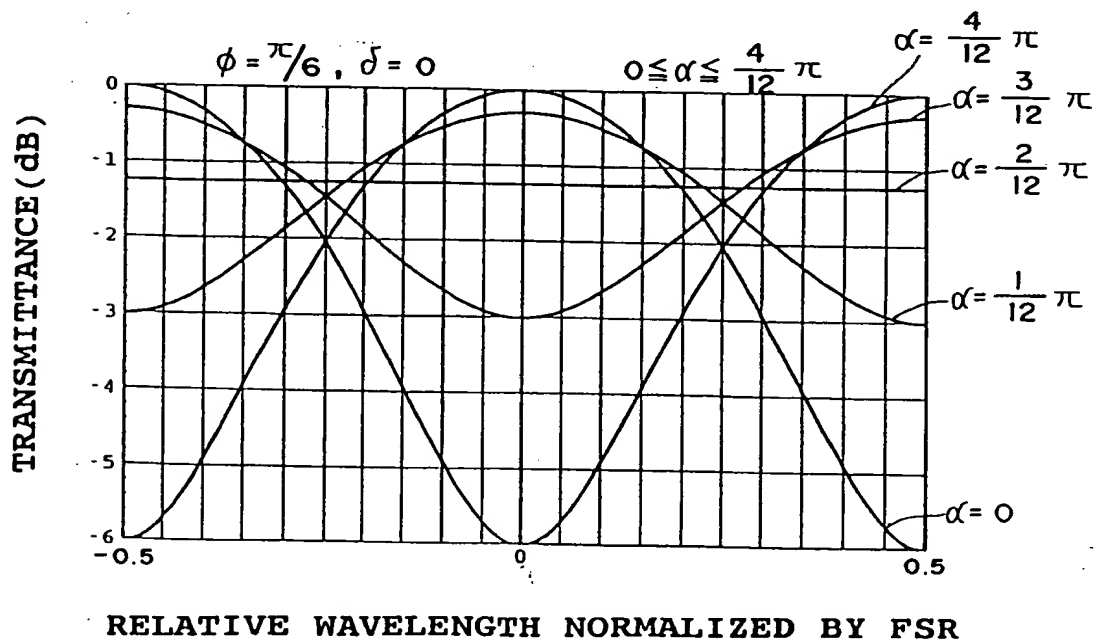


FIG. 13

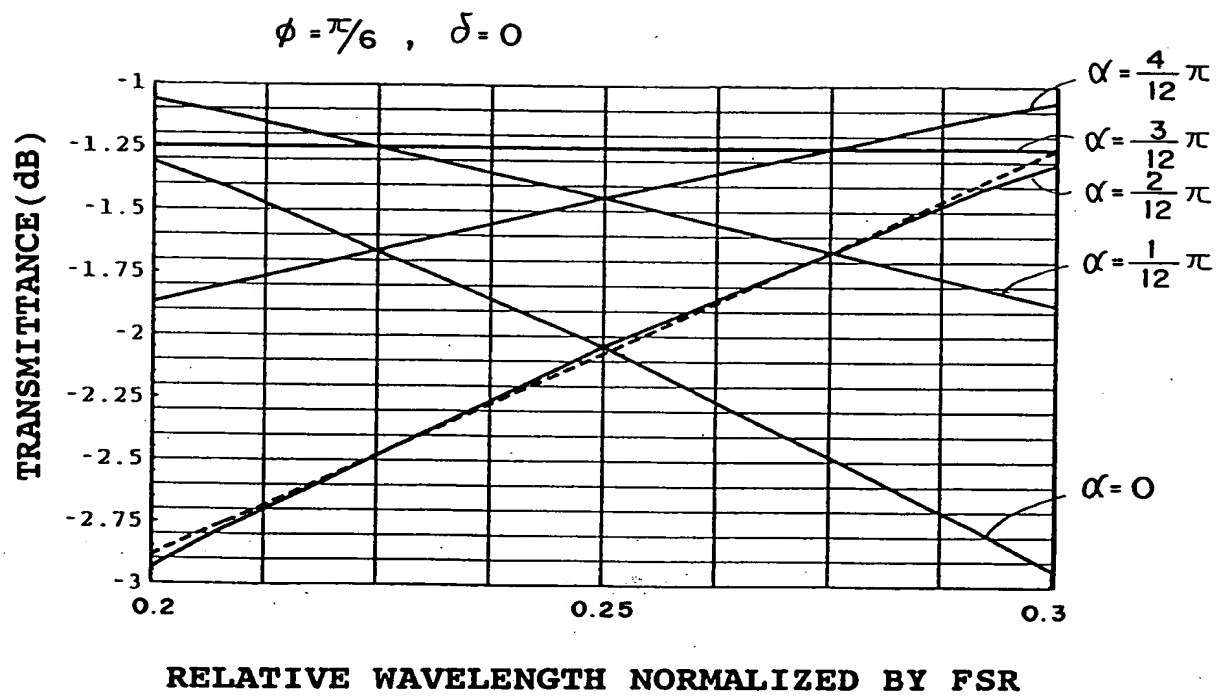


FIG. 14A

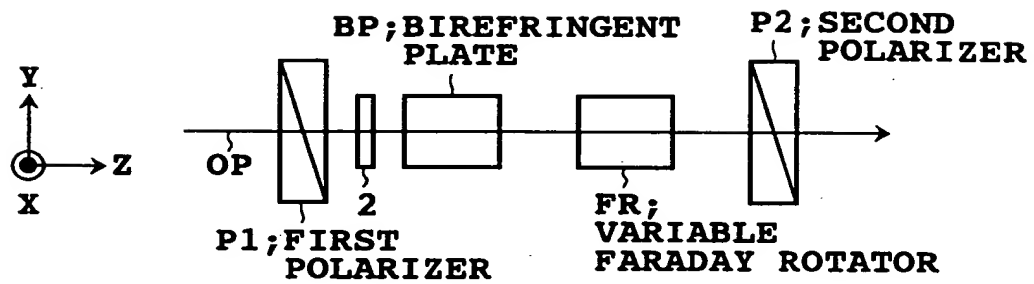


FIG. 14B

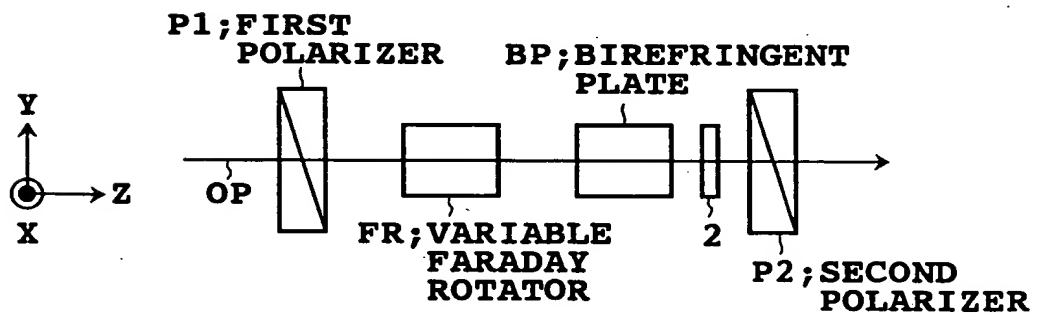


FIG. 15

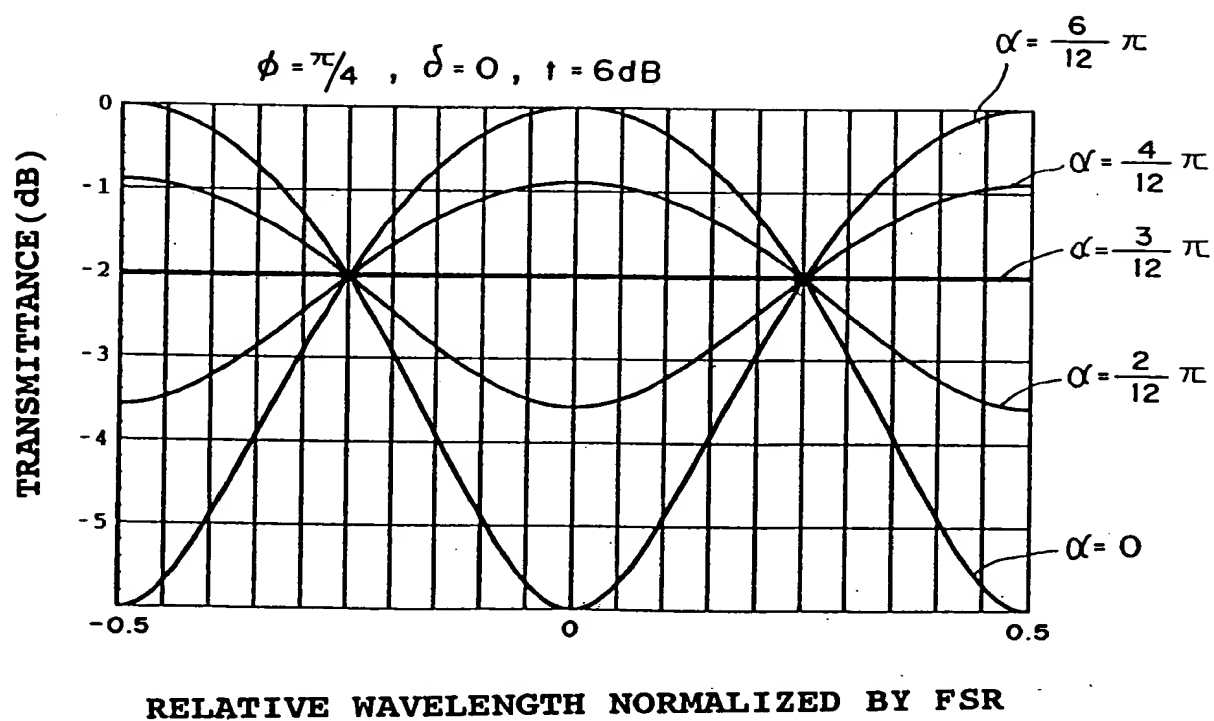


FIG. 16

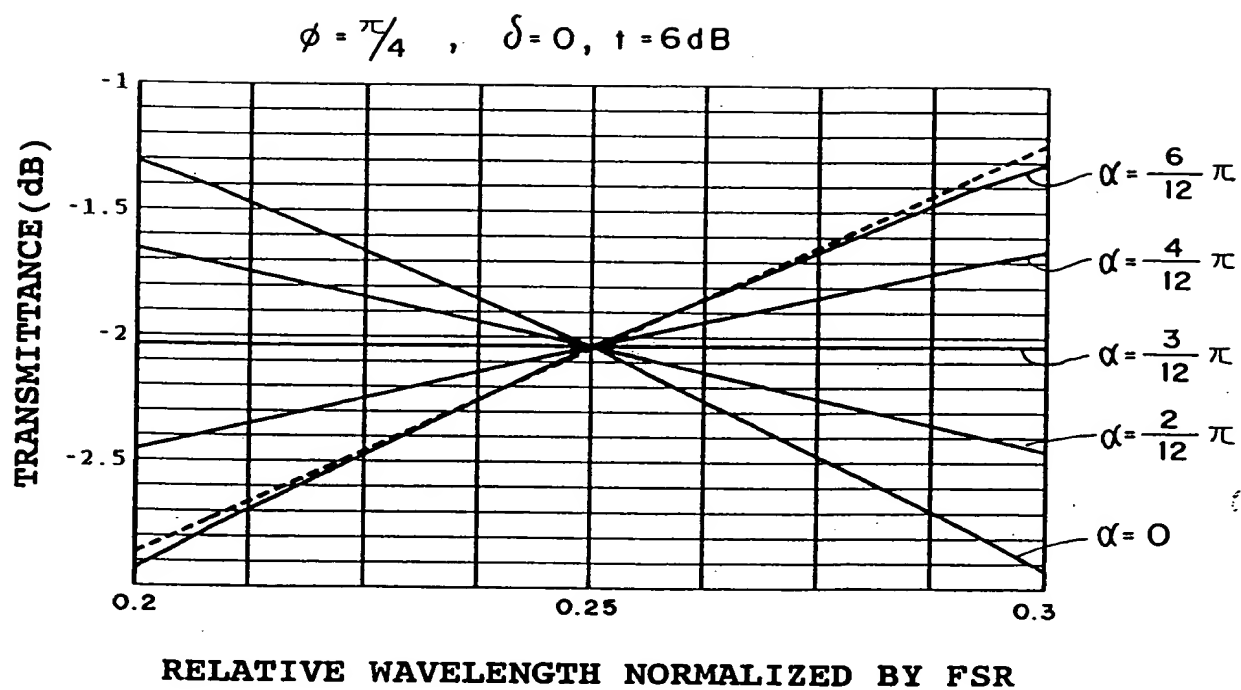


FIG. 17

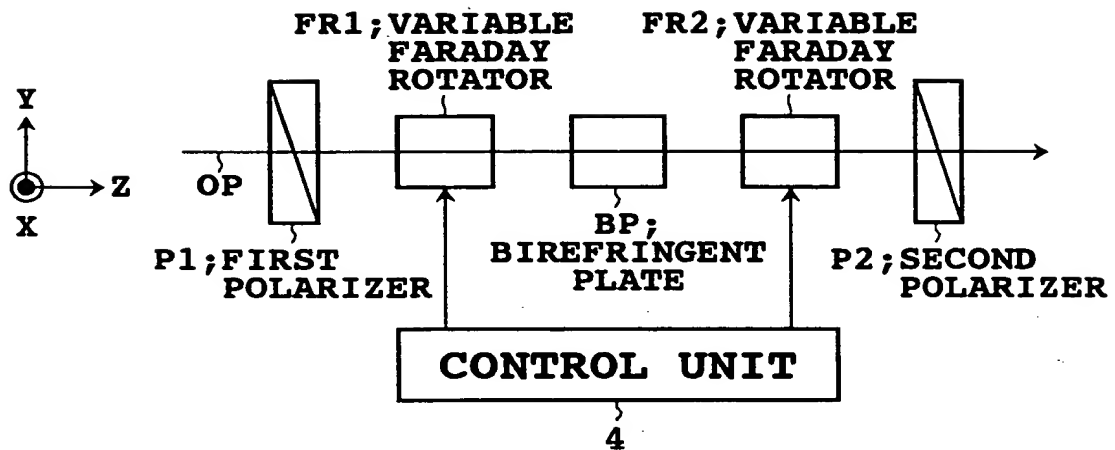


FIG. 18

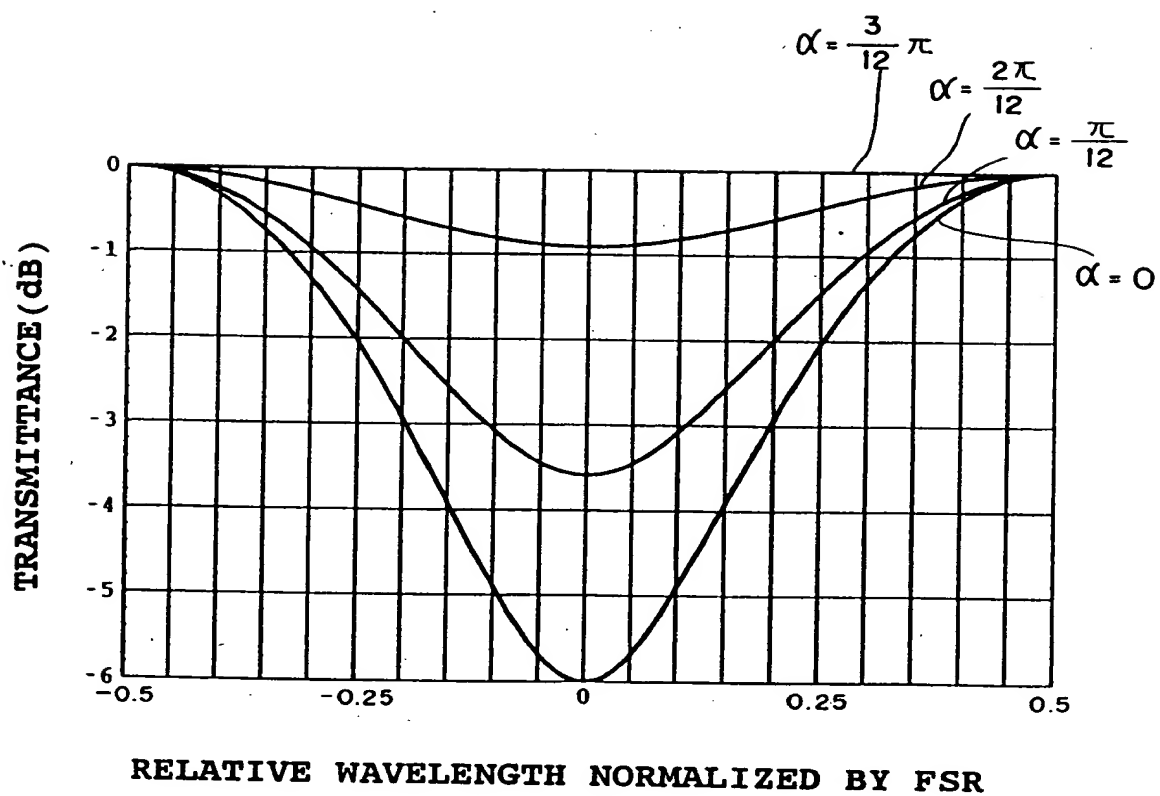


FIG. 19

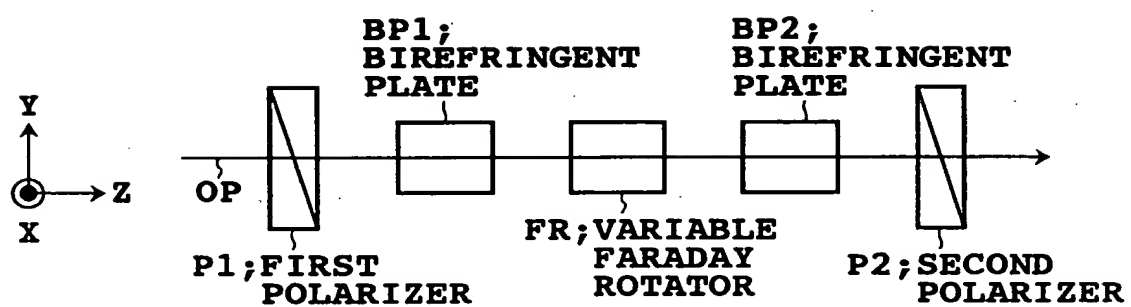


FIG. 20

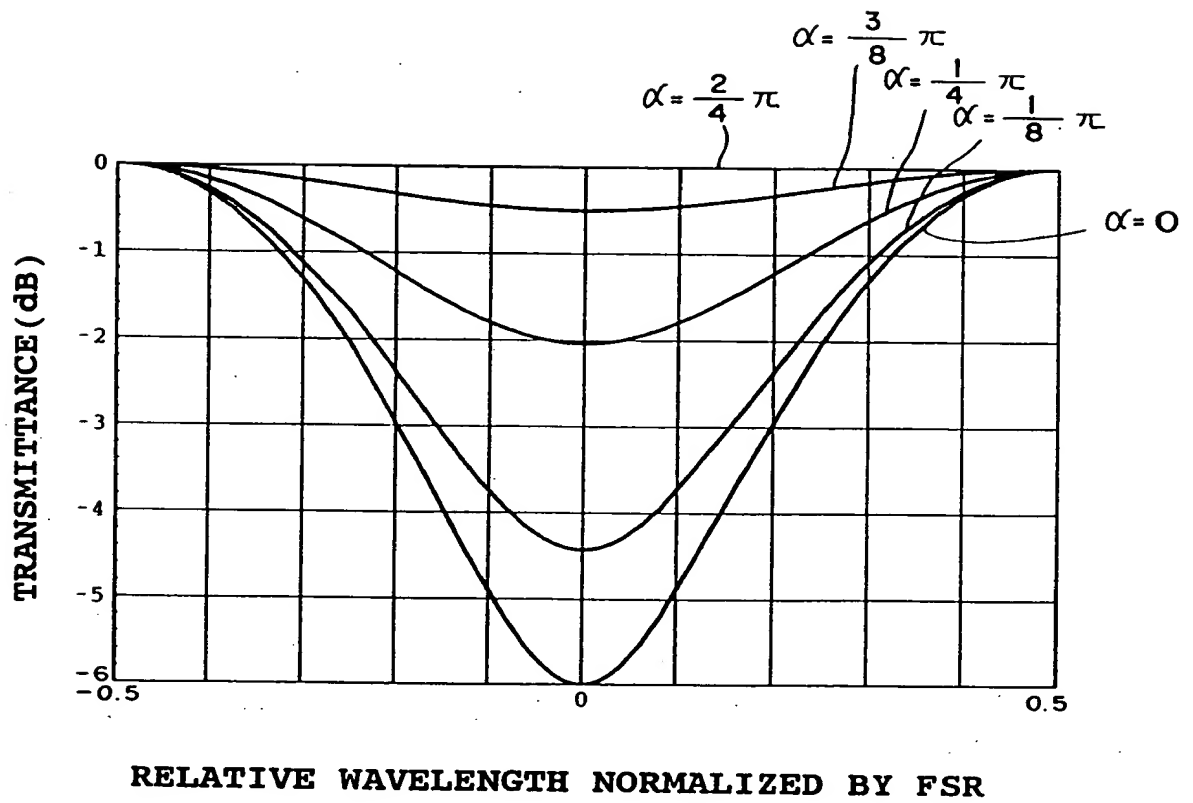


FIG. 21

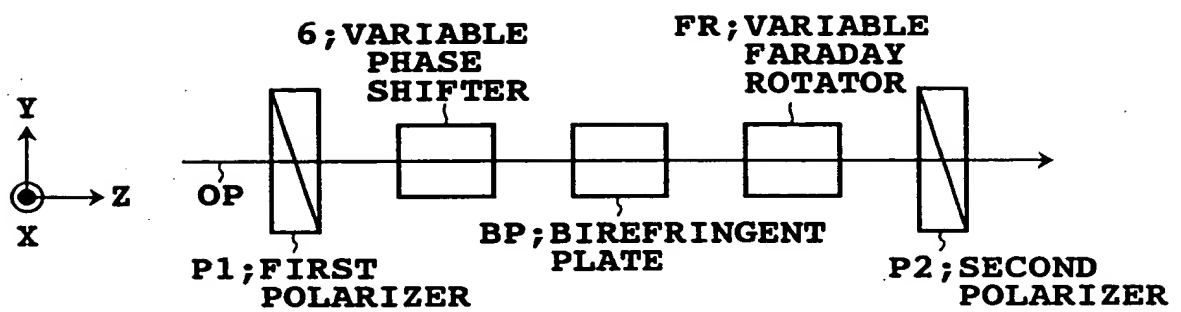


FIG. 22

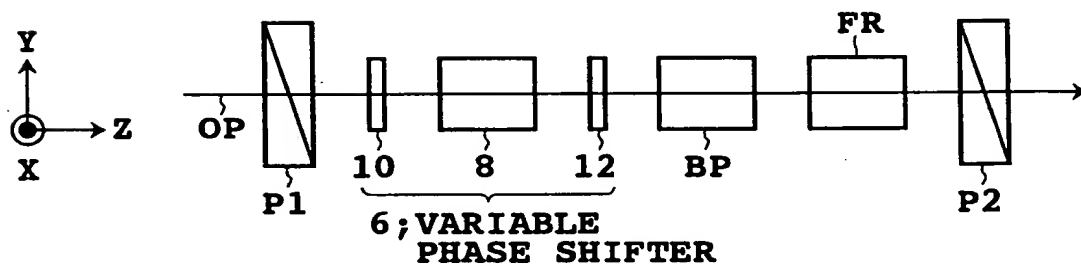


FIG. 23

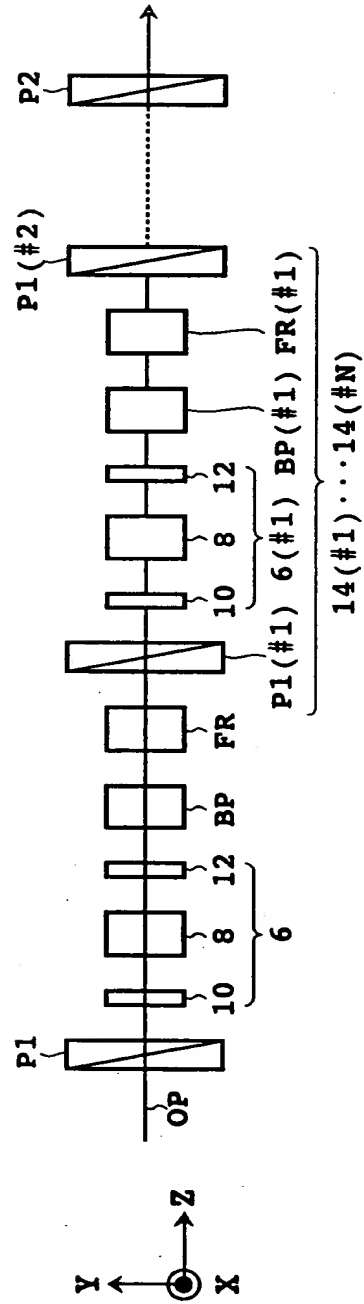


FIG. 24 A

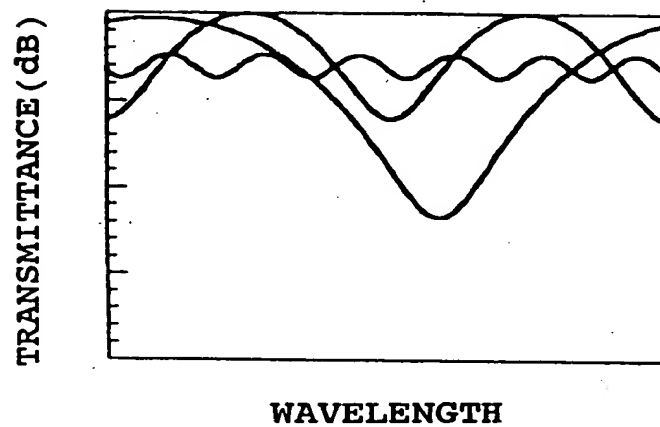


FIG. 24 B

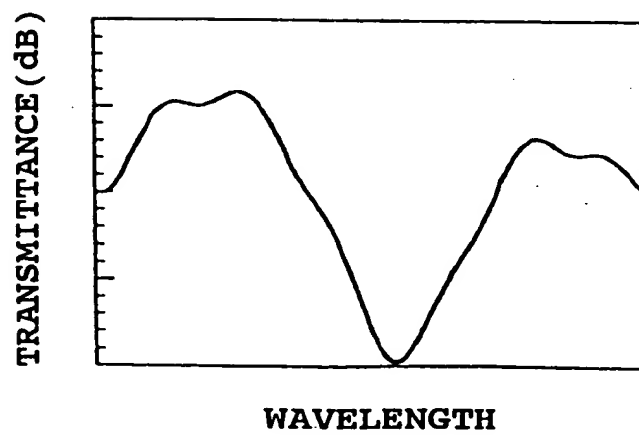


FIG. 25

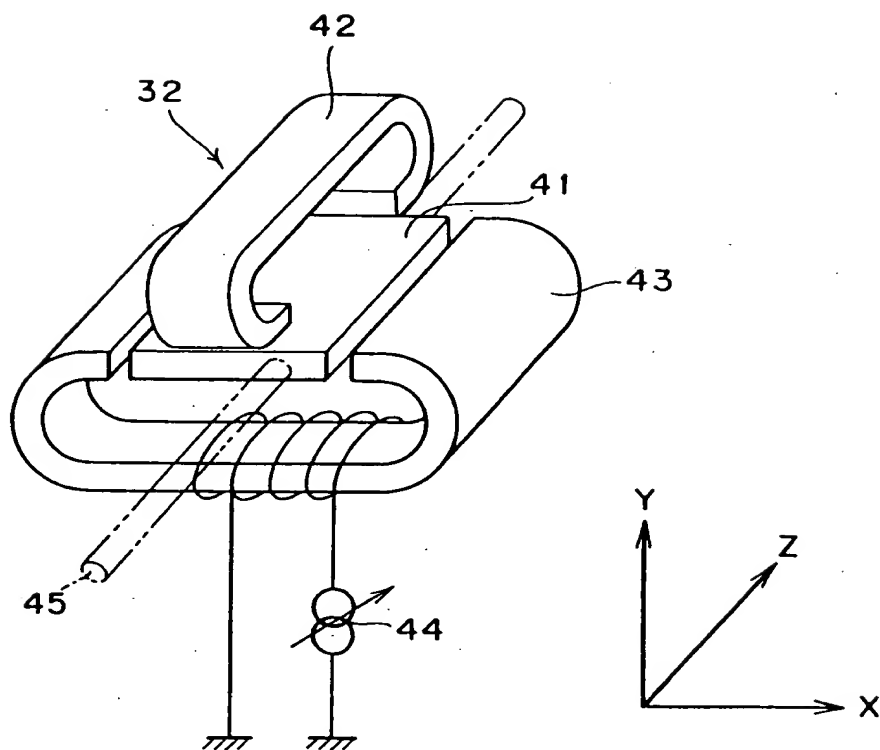


FIG. 26

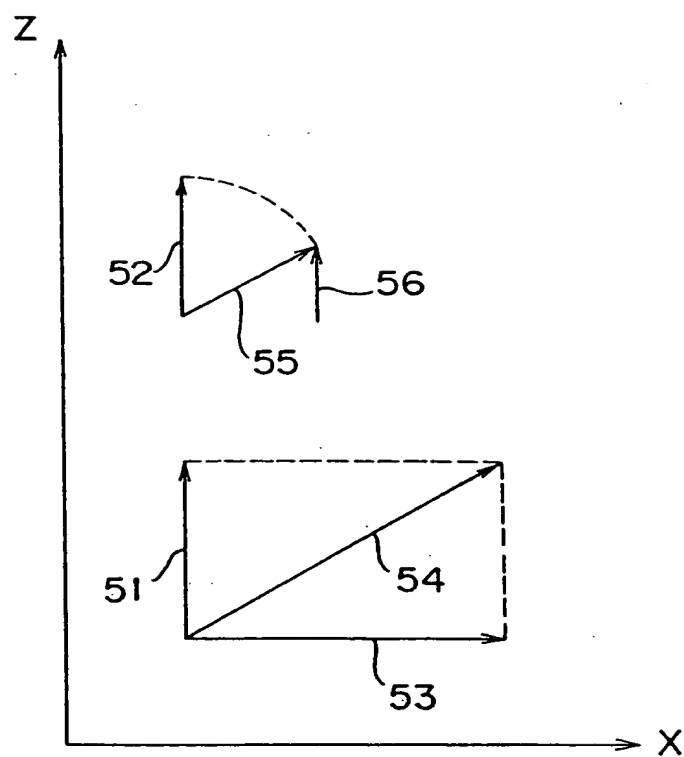


FIG. 27

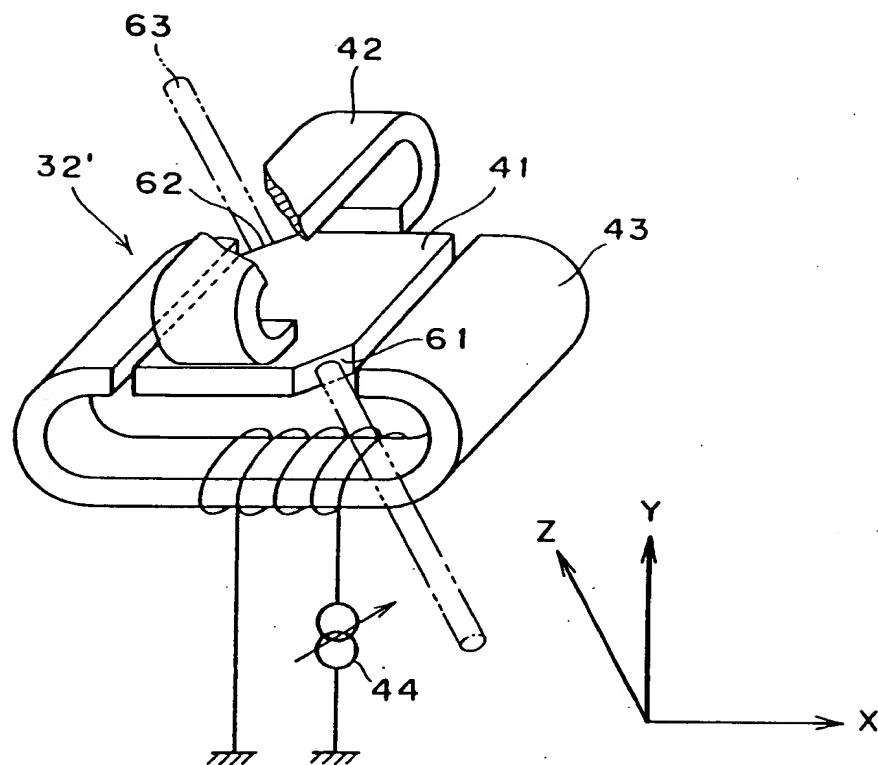


FIG. 28

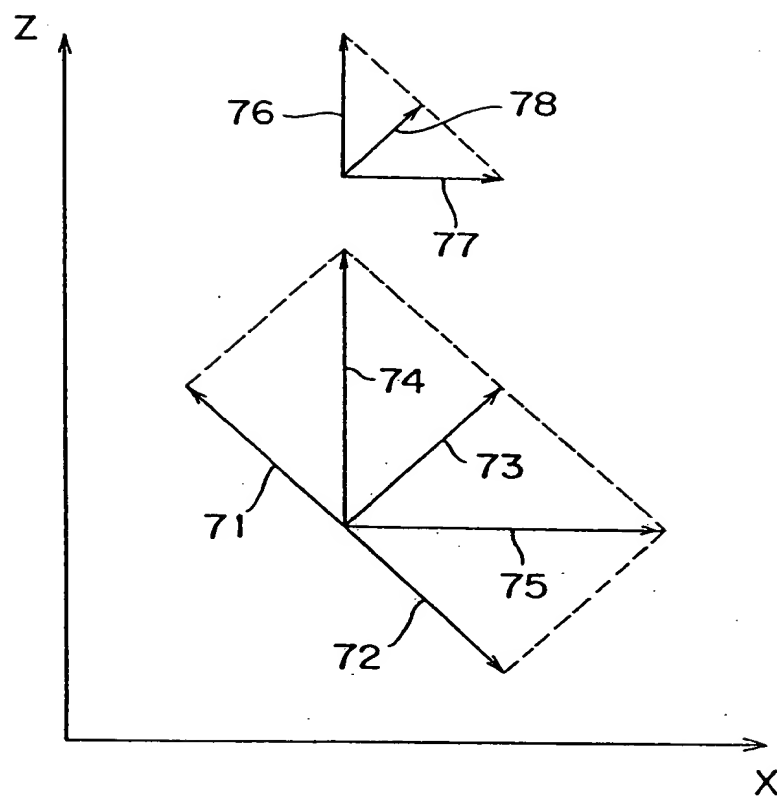


FIG. 29

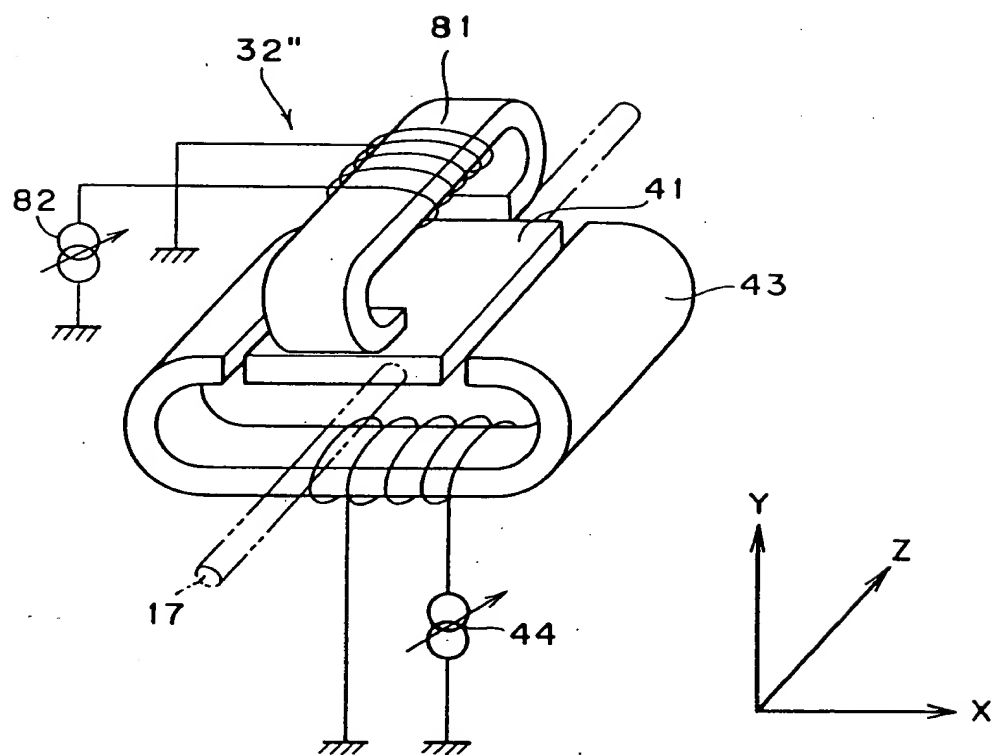


FIG. 30

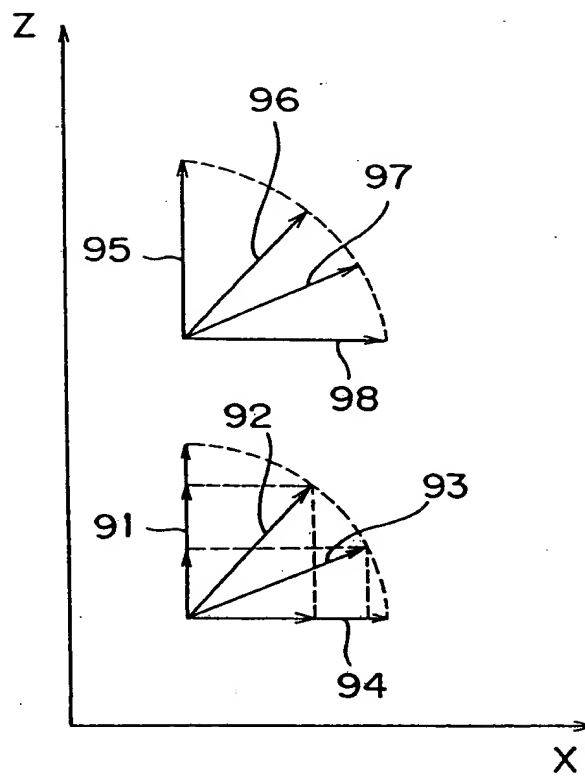


FIG. 31

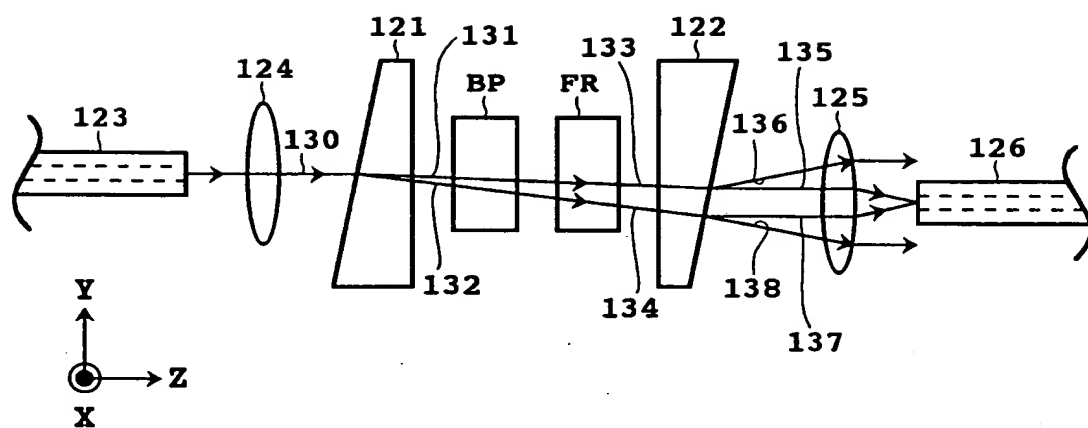


FIG. 32

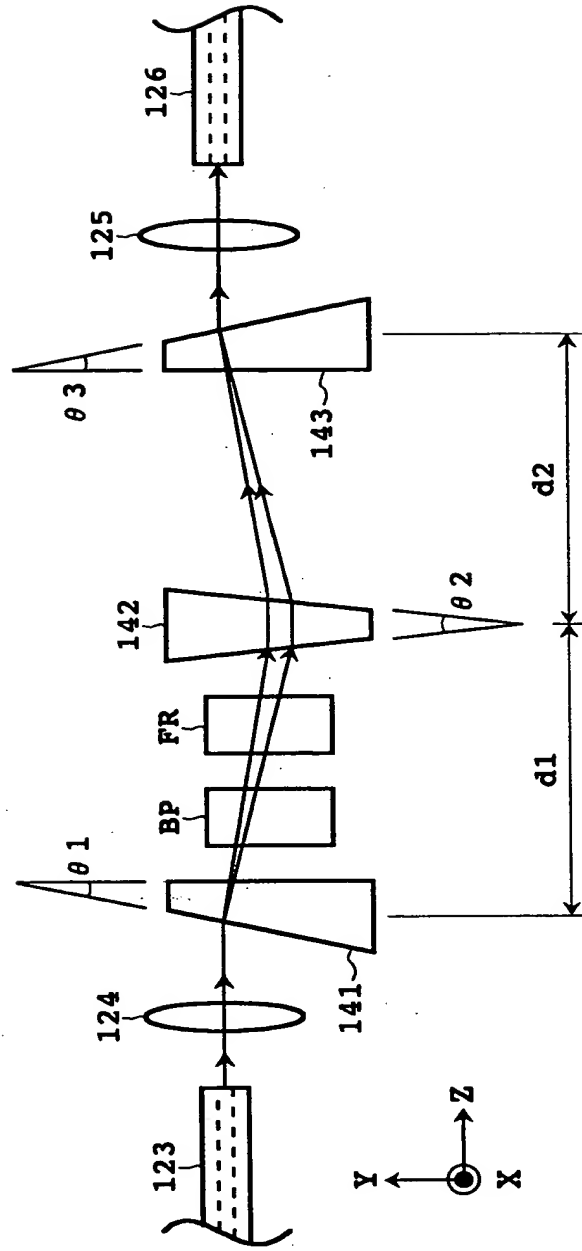


FIG. 33

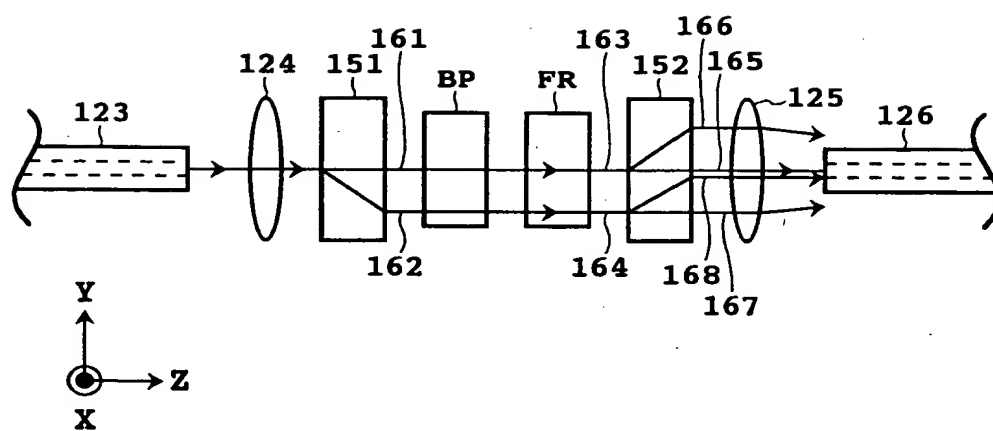


FIG. 34A

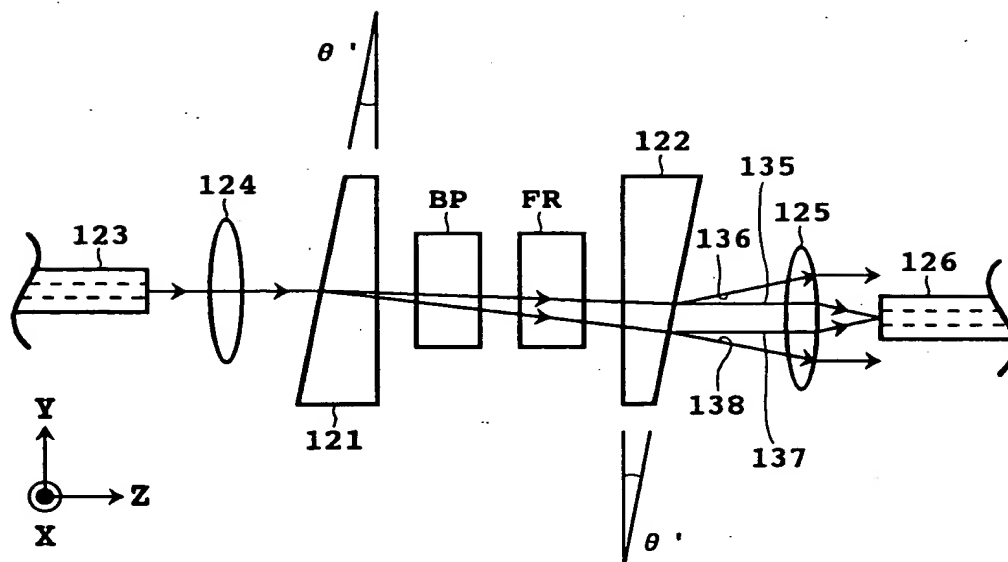


FIG. 34B

